

Martin Kanzian

Hybridantriebe in Personenkraftwagen

eingereicht als

Diplomarbeit

Hochschule Mittweida (FH)

University of Applied Sciences

Fachbereich Maschinenbau/Konstruktion
Mittweida, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Reglich

Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. Hans-Joachim Krämer

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 14.02.2011

Bibliographische Beschreibung:

Kanzian, Martin:

Hybridantriebe in Personenkraftwagen. – 2010. – 91 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau/Konstruktion, Diplomarbeit, 2010.

Kurzreferat

Hintergrund

Die Automobilbranche ist derzeit in einer Umbruchfase. Die Endlichkeit der fossilen Kraftstoffe auf Erdölbasis, Benzin und Diesel, aber vor allem die CO₂ Diskussionen und deren Folgen durch den Treibhauseffekt zwingen die Automobilhersteller alternative Antriebssysteme zu den bestehenden Otto- und Dieselmotorantrieben zu entwickeln. Für angehende Automobilingenieure und Praktiker ist daher ein Basiswissen über die neuen Antriebskonzepte unumgänglich.

Ziel der Diplomarbeit

Die Diplomarbeit soll Rahmenbedingungen aufzeigen, die die Einführung von Hybridfahrzeugen beeinflussen. Sie soll das grundsätzliche Verständnis der besonderen Funktionen von Hybridantrieben in Personenkraftwagen sowie deren Vor- und Nachteile vermitteln.

Der Energieverbrauch soll im Vergleich zu modernen konventionellen Antrieben von Personenkraftwagen aufgezeigt werden und die Zweckmäßigkeit des Hybridantriebes auf Basis von Otto- und Dieselmotoren bewertet werden. Bei der Literaturrecherche wird der Schwerpunkt auf bereits umgesetzte oder kurz vor der Umsetzung stehende Serienkonzepte gelegt.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

.....

Ort, Datum

Unterschrift

1. Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Bilder	VI
Verzeichnis der Tabellen	VII
Verzeichnis der Formeln	VIII
Verzeichnis der Begriffe und Definitionen	IX
Liste der Abkürzungen	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	1
1.3 Abgrenzung.....	2
2 Einführung	3
2.1 Geschichtlicher Hintergrund.....	4
2.2 Eines der ersten Hybridfahrzeuge.....	5
2.3 Hybridfahrzeugentwicklung	6
2.4 Erste Hybrid-Serienfahrzeuge	7
3 Hybridantriebe in Kraftfahrzeugen	8
3.1 Prinzip.....	8
3.2 Ziel.....	9
3.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	9
4 Betriebsarten	11
4.1 Hybridisches Fahren	11
4.2 Rein elektrisches Fahren.....	12
4.3 Boosten	12
4.4 Generatorbetrieb	12
4.5 Regeneratives Bremsen	12
4.6 Wirkungsgrad bei der Rekuperation	13
4.7 Start/Stopp Funktion.....	13
5 Einteilung der Hybridantriebe	14
5.1 Einteilung nach der Antriebskonfiguration	14
5.1.1 Serieller Hybrid	15
5.1.1.1 Plug-In-Hybridfahrzeuge mit Range Extender.....	17
5.1.1.2 Hybridisierter Brennstoffzellenantrieb	18
5.1.2 Paralleler Hybrid.....	19
5.1.3 Leistungsverzweigter Hybrid.....	23
5.1.4 Kombinierte Hybride	34

5.2	Einteilung der Hybridantriebe nach dem Hybridisierungsgrad (H)	36
5.2.1	Mild-Hybrid	37
5.2.2	Micro-Hybrid	38
5.2.3	Voll-Hybrid	39
6	Hauptkomponenten des Hybridantriebes	41
6.1	Verbrennungskraftmaschinen	41
6.1.1	Lastpunktanhebung	41
6.1.2	Atkinson-Prozess bei Otto-Verbrennungsmotoren	44
6.1.3	Downsizing	45
6.1.4	Reibungsoptimierung	45
7	Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge	46
7.1	Anforderungen	46
7.1.2	Charakteristik	48
7.2	Elektromaschinentypen	50
7.2.1	Drehstrommaschinen	50
7.2.2	Asynchronmaschinen	52
7.2.3	Synchronmaschinen	52
7.2.4	Permanenterregte Synchronmaschine	52
7.2.5	Geschaltete Reluktanzmaschine	53
7.2.6	Permanenterregte Transversalflussmaschinen	54
7.2.7	Gleichstrommaschinen	54
8	Kopplung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotoren	55
8.1	Stufenlose Getriebe	55
8.2	Leistungsverzweigte Getriebe	56
8.3	Vollautomatische gestufte Getriebe	59
9	Energiespeicher für Kfz-Antriebe	60
9.1	Zweck der Energiespeicher	60
9.2	Traktionsbatterien (Akkumulatoren)	61
9.2.1	Kenngrößen von Traktionsbatterien	63
9.2.3	Nickel-Metall-Hydrid-Batterie	65
9.2.4	Lithium-Ionen-Batterie	67
9.2.5	Batteriesystem	69
9.3	Kondensatoren	71
9.4	Schwungradspeicher	71
10	Nebenaggregate	73
10.1	Antriebsmanagement	73

11	Kraftstoffverbrauch bei Hybridfahrzeugen	75
11.1	Schadstoffemissionen	75
11.2	Abgasprüfung für die Typzulassung.....	76
11.3	Kraftstoffverbrauch.....	77
12	Zusammenfassung	81
13	Schlussbemerkung	83
	Literaturverzeichnis	84
Anhang	88
A1	Gesamtsymbole für den Abschnitt 5.1.3 (Leistungsverzweigter Hybrid)	88
A2	Hybridfahrzeugauflistung	89
A3	Kraftstoffverbrauchswerte aus Praxisversuch	91

Verzeichnis der Bilder

Abb. 1.1	Lohner Porsche. Elektroauto mit Radnabenvorderradantrieb	5
Abb. 1.2	Hybridfahrzeug Lohner Porsche „Semper Vivus“	6
Abb. 1.3	Hybridfahrzeug Audi Duo	7
Abb. 1.4	Hybridfahrzeug Toyota Prius	8
Abb. 4.1	Drehmomentverlauf Hybridantrieb zu Standardantrieb	11
Abb. 5.1	Hybridfahrzeuge, Einteilung nach der Antriebskonfiguration.	14
Abb. 5.2	Serieller Hybridantrieb	15
Abb. 5.3	Wirkungsgradkette beim Serienhybrid	16
Abb. 5.4	Parallelhybridantrieb mit Kupplung	19
Abb. 5.5	Parallelhybridantrieb mit Momentenaddition.....	20
Abb. 5.6	Parallelhybridantrieb mit Drehzahladdition	20
Abb. 5.7	Parallelhybridantrieb mit Zugkraftaddition	21
Abb. 5.8	Ein- und Zweiwellenhybrid	21
Abb. 5.9	Leistungsverzweigter Hybridantrieb	23
Abb. 5.10	Leistungsfluss im Antriebsstrang mit Leistungsverzweigung.....	23
Abb. 5.11	Aufbau eines elektrischen leistungsverzweigten Getriebes.....	24
Abb. 5.12	Leistungsfluss bei reiner Leistungsteilung	25
Abb. 5.13	Elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe	29
Abb. 5.14	Elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe, Wolfsches Schema	29
Abb. 5.15	Elektrische Leistung zu Eingangsleistung vom Verbrennungsmotor.....	30
Abb. 5.16	Blindleistungsfluss.....	31
Abb. 5.17	Dual-Mode-Getriebe.....	32
Abb. 5.18	Leistungsaufteilung beim Dual-Mode-Getriebe	32
Abb. 5.19	Modeaufteilung im Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm	33
Abb. 5.20	Kombinierter Hybridantrieb	34
Abb. 5.21	Einteilung der Hybridantriebe nach dem Hybridisierungsgrad.....	36
Abb. 5.22	Mild-Hybrid Komponentenordnung	37
Abb. 5.23	Micro-Hybrid Komponentenordnung	38
Abb. 5.24	Full-Hybrid Komponentenordnung	39
Abb. 5.25	Serieller-Plug-In Hybrid Komponentenordnung	40
Abb. 6.1	Verbrauchskennfeld eines Otto-Saugmotors	42
Abb. 6.2	Atkinson-Prozess	44
Abb. 7.1	Drehmoment und Leistungskurve einer Asynchronmaschine 45.....	47
Abb. 7.2	Vierquadrantenbetrieb eines elektrischen Antriebs	48
Abb. 7.3	Vergleich Zugkraft an den Antriebsrädern zum E-Maschinendrehmoment	49
Abb. 7.4	Übersicht Wechselstrommaschinen	50
Abb. 7.5	Läuferunterschiede	51
Abb. 8.1	Parallel-Hybrid mit CVT Getriebe	56
Abb. 8.2	Toyota Prius III-Hybridantrieb	57

Abb. 8.3	Toyota Prius III, Elektromotoren mit Planetenradgetriebe.....	57
Abb. 8.4	Two-Mode Getriebe.....	58
Abb. 8.5	Sieben-Gang-Automatikgetriebe mit Motorgenerator.....	59
Abb. 9.1	Mögliche Formen der Energiespeicherung.....	60
Abb. 9.2	Luftgekühltes NiMH-Hochvoltbatteriesystem	66
Abb. 9.3	Klimatisierte Li-Ionen-Hochvoltbatteriesystem	68
Abb. 9.4	Aufbau eines Hochvoltbatteriesystems.....	69
Abb. 9.5	Diagramm Energiespeicherleistungen	72
Abb. 11.1	Neuer Europäischer Fahrzyklus.....	76

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1.1	Weltbevölkerung in Millionen	3
Tabelle 5.1	Daten für Hybrid- und Elektroantriebe	40
Tabelle 9.1	Spezifischer Energieinhalt, Kraftstoffe und Batterien	61
Tabelle 9.2	Anforderungen an Batteriesysteme	63
Tabelle 9.3	Technische Daten der NiMH-Batterie, Toyota Prius 3	67
Tabelle 9.4	Technische Daten der Li-Ion-Batterie, Mercedes S 400 Hybrid.....	68
Tabelle 11.1	Ottomotor Euro-Abgasgrenzwerte	75
Tabelle 11.2	Dieselmotor Euro-Abgasgrenzwerte	75
Tabelle 11.3	Hybridfahrzeuge, Kraftstoffeinsparpotential	78
Tabelle 11.4	Hybridfahrzeuge, Kraftstoffverbrauchswerte.....	78

Verzeichnis der FORMELN

(1)	Max. zulässige CO ₂ Emissionen.....	10
(2)	Aufteilungsfaktor ε	25
(3)	Mechanisch aufgenommene Leistung P_{VE} der E-Maschine E1	25
(4)	Übertragene elektrische Leistung P_{EL} im elektrischen Kreis.....	26
(5)	Leistung am Variatorausgang P_{VA}	26
(6)	Leistungsaufteilungsverhältnis ε_{EL}	27
(7)	Ausgangsformel für den Getriebegesamtwirkungsgrad η_{ges}	27
(8)	Endformel für den Getriebegesamtwirkungsgrad η_{ges}	27
(9)	Drehmomentaufteilung beim Planetenradgetriebe (Sonnenrad).....	28
(10)	Drehmomentaufteilung beim Planetenradgetriebe (Hohlrad).....	28
(11)	Standübersetzung	28
(12)	Radsatzübersetzung	29
(13)	Drehmoment am Variatoreingang	30
(14)	Drehmoment am Variatoreingang mit Übersetzungsfaktor.....	30
(15)	Hybridisierungsgrad	36
(16)	Hubraumleistung.....	45
(17)	Synchrone Drehzahl.....	49
(18)	Schlupf.....	49
(19)	Elektrische Energie	64
(20)	Rotationsenergie	72

Verzeichnis der Begriffe und Definitionen

Alternative Antriebskonzepte

Als Alternative Antriebskonzepte werden Antriebe bezeichnet, welche den Betrieb von alternativen Kraftstoffen, z.B. Biodiesel, Erdgas oder Wasserstoff in herkömmlichen Verbrennungsmotoren ermöglichen, oder alternative Antriebsarten wie z.B. einen Brennstoffzellenantrieb, vorsehen.

Alternative Kraftstoffe

Der Begriff „alternativ“ bezieht sich nicht auf bestimmte Eigenschaften oder Vorzüge eines Kraftstoffs, sondern besagt lediglich, dass es sich um eine Alternative zu konventionellem Otto- oder Diesekraftstoff handelt.

Elektrischer Boost

Es ist eine Funktion beim Hybridantrieb welche die maximale Antriebsleistung liefert. (Kickdown-Funktion bei Verbrennungsmotoren).

Hybrid

Das Wort „Hybrid“ kommt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie Zwitter, „von zweierlei Herkunft“, andersartigen Eltern (etwas Gekreuztes, Gemischtes).

Hybridfahrzeug

Ein „Hybridfahrzeug“ bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiesysteme im Fahrzeug eingebaut sind, um das Fahrzeug anzutreiben.

Hybridtechnik

Zurzeit versteht man unter Hybridtechnik die Kombination von einem Verbrennungsmotor und einer Elektromaschine.

Rekuperation

Allgemein bezeichnet dieser Begriff in der Technik ein Verfahren zur Energierückgewinnung. Es wird eine vorliegende Energieform in eine andere, weiter nutzbare Energieform, umgewandelt.

Liste der Abkürzungen

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
BMW	Byerische Motoren Werke
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CVT	Continuously Variable Transmission (stufenloses Getriebe)
DC	Direct Current
ECE	Economic Commission for Europe
E-CVT	Electrically Variable Transmission (elektrisches stufenloses Getriebe)
EU	Europäische Union
EVT	Electrically Variable Transmission (E-CVT, elektrisches stufenloses Getriebe)
GM	General Motors
HC	Kohlenwasserstoffe
IMA	Integrated-Motor-Assist (PKW-Hybridantrieb von Honda)
LEV	Low Emission Vehicle (schadstoffarmes Fahrzeug)
LKW	Lastkraftwagen
LPA	Lastpunktanhebung
M ₁	Fahrzeugklasse (PKW)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrtzyklus
NO _x	Stickoxide
PKW	Personenkraftwagen
SOC	State of Charge (Ladezustand der Batterie)
SOH	State of Health (Alterungszustand der Batterie)
SRM	Switched reluctance machine (geschaltete Reluktanzmaschine)
SUV	Sport Utility Vehicle
UDC	Urban Driving Cycle
UNO	United Nations Organization (Organisation der Vereinten Nationen)
URL	Universal Resource Locator
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VKM	Verbrennungskraftmaschine
ZEV	Zero Emission Vehicle (emissionsfreies Fahrzeug)

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die kontinuierlich steigenden Kraftstoffpreise, die Abhängigkeit von den fossilen Energieträgern und vor allem die zunehmend spürbaren Umwelteinflüsse der Klimaerwärmung durch den Treibhauseffekt des Kohlendioxid (CO₂) haben mein Interesse an alternativen Antriebssystemen von Personenkraftwagen geweckt. Bisher wurden die Antriebssysteme der Kraftfahrzeuge, von wenigen Ausnahmen abgesehen, von den Otto- und Dieselmotoren dominiert. Diese wurden und werden laufend verbessert. Sie werden daher auch die Hauptantriebsquellen der nächsten 20-30 Jahre sein. Zukünftig wird es aber auch andere Antriebssysteme oder auch Mischformen geben. Eine Antriebsmischform ist der Hybridantrieb.

In der Vergangenheit hat es im Wesentlichen nur zwei Fahrzeughersteller (Toyota, Honda) gegeben die Personenkraftwagen mit Hybridantrieb in Serie herstellten. Heute sind alle Fahrzeughersteller weltweit intensiv an der Entwicklung und Serienumsetzung von Fahrzeugen mit Hybridantrieben und anderen alternativen Antrieben beschäftigt.

1.2 Ziel der Arbeit

Diese Diplomarbeit entstand aufgrund meiner beruflichen Tätigkeit als Berufsschullehrer für Kraftfahrzeugtechnik und aus Eigeninteresse an modernen zukunftsweisenden alternativen Antriebssystemen von Personenkraftwagen, vor allem an Hybridantrieben mit Verbrennungsmotor und Elektromotor als Antriebsquellen.

Personenkraftwagen mit dieser Antriebskonfiguration werden bereits seit über 10 Jahren in Serie hergestellt und verkauft.

Mit dieser Arbeit:

- führe ich in die Hybrid-Antriebstechnik von Personenkraftwagen ein,
- beschreibe ich die verschiedenen Grundvarianten mit Vor- und Nachteilen,
- erkläre ich wichtige Fachbegriffe,
- beschreibe ich das Funktionsprinzip wichtiger Hybridkomponenten,
- zeige ich Wirkungsgrade auf,
- soll dem Leser eine Hilfestellung zur systematischen Einarbeitung und Beurteilung von bestehenden und zukünftigen Hybridsystemen zur Verfügung gestellt werden.

1.3 Abgrenzung der Diplomarbeit

Aufgrund der großen Vielfalt an tangierten Fachbereichen bei der Hybridtechnik ist es nicht möglich, bei jeder Komponente die Grundlagen ausführlich zu behandeln. Der Schwerpunkt liegt bei allgemeinen Ansätzen und Betrachtungsweisen und nicht bei Detaillösungen.

Alternative Antriebe wie z.B. der Brennstoffzellenantrieb, reiner elektrischer Antrieb und alternative Kraftstoffe werden nur soweit behandelt, als sie zum besseren Verständnis und Unterscheidungen bei den Hybrid- und konventionellen Antrieben dienen.

2. Einführung

Am Anfang des 21. Jahrhunderts werden die Kraftfahrzeuge, Pkw, Lkw, Busse, Motorräder usw. fast ausschließlich von Verbrennungsmotoren nach den Systemen von Otto und Diesel angetrieben. Die Menschen auf der Erde leben mit den Vor- und Nachteilen der alt-hergebrachten Technik.

Der Energiebedarf insgesamt wird weltweit aufgrund des Mehrverbrauchs in den Industriestaaten, der wachsenden Erdbevölkerung und der weiteren Industrialisierung von Entwicklungs- und Schwellenländern, vor allem China und Indien steigen.

Region \ Jahr	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Nordamerika	318	351	383	410	431	448
Lateinamerika	521	588	645	689	718	729
Europa	726	732	732	723	708	691
Asien	3.698	4.166	4.596	4.916	5.125	5.231
Afrika	819	1.033	1.276	1.524	1.769	1.998
Welt	6.115	6.908	7.674	8.308	8.801	9.149

Tabelle 1.1 Weltbevölkerung in Millionen nach UNO-World Population Prospects (2008 Revision).¹

Der wichtigste Primärenergieträger für die Mobilität ist immer noch das Erdöl. Genaue Zeitangaben, wie lange das Erdöl noch reichen wird, kann derzeit niemand machen. Reichen die bekannten Vorkommen und die noch zu erschließenden Ressourcen noch 30, 50 oder 100 Jahre?

Der zunehmende Energieverbrauch, die politische Situation in den Erdölförderländern, sowie durch Erdöl-Katastrophen hervorgerufene Umweltzerstörungen werden den Erdölpreis und damit die Treibstoffpreise weiter ansteigen lassen.

Einhergehend mit dem steigenden Energieverbrauch, hat auch die Umweltbelastung durch Kohlendioxid (CO₂), Stickoxide (NO_x) und Feinstaub zugenommen.

Der Verkehrssektor ist für einen bedeutenden Teil des Primärenergieverbrauchs und damit verbundenen Schadstoffentwicklung verantwortlich.

In industriell erzeugten Abgasen und in Fahrzeugabgasen befinden sich Schadstoffe, die den Treibhauseffekt verstärken (CO₂), die Ozonschicht abbauen, zu einer Versauerung und Überdüngung der Böden und zur Luftverschmutzung führen.

Die Endlichkeit der Erdölvorräte, die Preisentwicklung des Erdöls, die Abhängigkeit von den Förderländern, Umweltkatastrophen bei der Förderung und beim Transport von Erdöl

¹ <http://esa.un.org/unpp/index.asp?panel=1> (14.09.2010)

und vor allem der CO₂ Ausstoß und deren weltweite Folgen zwingen uns den Energieverbrauch schrittweise stark zu reduzieren und andere Energiequellen nutzbar zu machen.

In diesem Zusammenhang wird derzeit weltweit intensiv an der Verbesserung des Otto- und Dieselmotors, dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen und an der Entwicklung von alternativen Antriebssystemen geforscht und gearbeitet.

Bereits realisierte und in der Umsetzungsphase befindliche Hybridantriebe werden von vielen Automobilexperten als Zwischenschritt zum reinen Elektroauto gesehen.

2.1 Geschichtlicher Hintergrund

Der Hybridantrieb an sich ist keine neue Entwicklung, sondern schon fast seit dem Beginn der Automobilisierung bekannt. Anfang des 20. Jahrhunderts spielten insbesondere in den USA Elektrofahrzeuge eine große Rolle.²

Um 1900 ist auf amerikanischen Straßen das Auto mit Elektroantrieb erheblich häufiger zu sehen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Die Nachteile wie geringe Reichweite, Ladedauer und das Fahrzeuggewicht durch die schweren Bleibatterien waren schon damals bekannt. Aber die einfache Handhabung der Autos, ihre Sauberkeit und ihr lautloser Lauf werden von den amerikanischen Autofahrern und Autofahrerinnen geschätzt. Allein die Notwendigkeit einen Verbrennungsmotor anzukurbeln, verschreckte viele Interessenten.

Die Nachteile der Elektromobile, ihre geringe Reichweite und geringe Geschwindigkeit, fallen in den USA kaum ins Gewicht. Es fehlt ein ausgebautes Netz an Überlandstraßen, dass die großen Städte und Regionen miteinander verbindet. Der Autoverkehr beschränkt sich auf die großen Metropolen der USA.

Auch ein Pionier der Elektroindustrie, Thomas Alva Edison, hatte nach dem Aufkommen der ersten Automobile in den USA allein dem Verbrennungsmotor eine Zukunft prophezeit. 1905 kündigte Edison den Bau einer Batterie mit einer erheblich größeren Kapazität an, die den Aktionsradius der Elektromobile vervielfachen sollte. Das Vorhaben wurde aber nicht mehr umgesetzt.³

Otto-Benzinmotoren setzen sich langsam durch.

Die zunehmende Zuverlässigkeit und Benutzerfreundlichkeit der Benzinautos und der fortschreitende Straßenbau zwischen den Metropolen lassen den Anteil der Elektroautos wenige Jahre später rapide fallen. Diese Entwicklung geht einher mit dem drastischen Verfall der Benzinpreise. Der Benzinmotor, dessen Schicksal um die Jahrhundertwende nicht ab-

² Vgl. Hans-Otto Neubauer 1997, S. 38

³ Vgl. Hans-Otto Neubauer 1997, S. 47

zusehen war, hat nun auch in den USA die Vorherrschaft errungen. In Europa tritt der Gegensatz der Antriebsarten nicht so deutlich auf. Dampf scheidet früh aus, und Elektrizität fällt etwa 1907 endgültig zugunsten des Benzins zurück. Auch damals gab es schon die ersten Ansätze, die Vorteile elektrischer Maschinen, insbesondere ihre gute Regelung, mit denen von Verbrennungsmotoren zu kombinieren.

2.2 Eines der ersten Hybridfahrzeuge

Ferdinand Porsche entwickelte bereits 1899 den Lohner-Porsche, das erste Elektroauto mit Radnabenmotoren für die Wiener Wagenbaufirma Jacob Lohner & Co. 1900 wurde es auf der Pariser Weltausstellung vorgestellt und als wegweisendes Konzept gefeiert.



Abb 1.1 – Lohner-Porsche. Elektroauto mit Radnabenantrieb an der Vorderachse.
Quelle: Auto-Motor und Sport.⁴

Als wesentliche Vorteile ergaben sich der totale Wegfall von Transmissionswegen und die Minimierung mechanischer Verluste. Das neue Antriebssystem kann allerdings die entscheidenden Nachteile des Elektroantriebs – hohes Batteriegewicht und geringer Aktionsradius – nicht wettmachen.

Porsche übernimmt daraufhin ein von der belgischen Firma Pieper entwickeltes System mit der Bezeichnung Mixte. Bei dieser Technik handelt es sich um eine Kombination aus Benzinmotor, Generator und Akkumulator. Der stets mit gleichbleibender Geschwindigkeit laufende Benzinmotor übernimmt die Aufgabe, die Akkumulatoren laufend über den Generator aufzuladen. Als Antriebsmittel dienen die an den Vorderrädern eingebauten Radnabenmotoren. Der Zwang zur Aufladung der Akkus am Netz und die Beschränkungen im Aktionsradius entfallen. Da der technische Aufwand jedoch sehr hoch ist, kann sich das System nicht durchsetzen. Dieses war somit eines der ersten Hybridfahrzeuge im Jahre 1900.

⁴ <http://www.auto-motor-und-sport.de/...../1939709.html> (25.07.2010)

Der Lohner Porsche „Semper Vivus“ besaß bereits zwei Verbrennungsmotoren sowie elektrische Radnabenmotoren und konnte in einer Batterie Energie zwischenspeichern.



Abb. 1.2 – Lohner-Porsche „Semper Vivus“. Quelle: Porsche ⁵

Um 1900 bis 1915 wurden auch in Spanien den USA und Kanada einzelne Hybridfahrzeuge gebaut.⁶

2.3 Hybridfahrzeugentwicklung

Die Diskussionen während der Energiekrise in den 1970er Jahren bzw. die Abhängigkeit des Individualverkehrs vom Erdöl hat zur verstärkten Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Hybridantriebe geführt. Es wurden auch kleinere Serien gebaut.

Ansatzpunkt war die Möglichkeit der Kraftstoffeinsparung durch die Kombination eines Verbrennungsmotors mit einem Elektroantrieb, auch die Verringerung von Kohlendioxidemissionen war und ist ein wichtiges Thema.

Anfang der 1990er Jahre wurden Hybridfahrzeuge als eine Möglichkeit zur Emissionsreduzierung angesehen. Wegen der Fortschritte bei der Verbrauchs- und Abgasreduzierung konventioneller Verbrennungsmotoren und dem prognostizierten Potential des Brennstoffzellenantriebs ist die Entwicklung von Hybridantrieben Ende der 1990er Jahre jedoch fast zum Stillstand gekommen. Ausgenommen in Japan (Toyota, Honda). Die Brennstoffzellenfahrzeuge sind jedoch, Stand 2010, noch Versuchsträger und nicht serienreif (z.B. B-Cell von Mercedes).

Europäische Automobilfirmen waren in der Hybridtechnik führend. Leider waren sie nicht konsequent genug um die Hybridtechnik einzuführen.

⁵ Vgl. <http://www.porsche.com/...../lohnerporsche> (30.08.2010)

⁶ Vgl. Hofmann 2010, S. 8 f

Bereits 1974 stellte VW ein Hybridkonzept für den Wettbewerb „New York Taxi vor“, mit dem rein elektrisch gefahren werden konnte und Bremsenergie für die Batterieladung genutzt wurde. Zwischen 1991 und 1993 führte VW einen Flottenversuch mit 20 Golf II-Parallelhybrid-Fahrzeugen in Zürich durch.

1989 präsentierte Audi auf Basis des Audi 100 Avant quattro die erste Generation des Hybrid-Experimentalfahrzeugs Audi duo.

Zwei Jahre später stellte Audi die zweite duo Generation vor. Ebenfalls auf der Basis des Audi 100 Avant quattro.

Auch in den USA, Japan und Europa experimentierten zwischen 1970 bis 1995 Firmen mit Hybridantriebskonzepten. Neben Otto- und Dieselerbrennungsmotoren wurden bei den Untersuchungen auch Wankelmotoren, Stirlingmotoren, Gasturbinen und Brennstoffzellen eingesetzt.⁷

2.4 Erste Hybrid-Serienfahrzeuge

1997 baute Audi als erster und nach wie vor einziger Hersteller in Europa ein Hybridfahrzeug in Serie. Den Audi duo auf Basis des A4 Avant.⁸

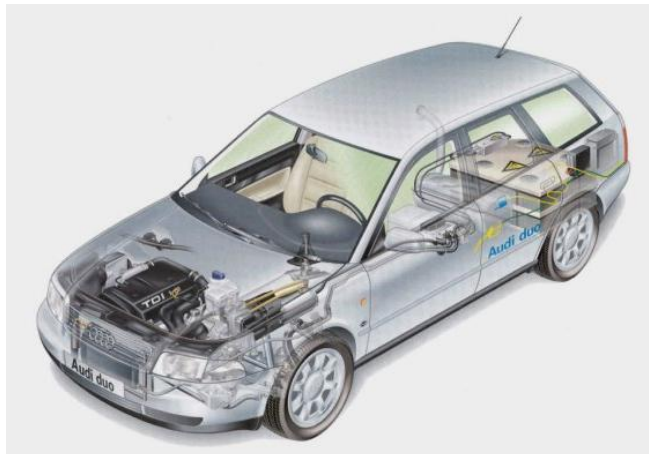


Abb. 1.3 – Hybridfahrzeug Audi duo. Quelle: Audi⁹

Für seinen Antrieb sorgten ein 1,9-Liter-TDI mit 90 PS und zusätzlich ein Elektromotor mit 29 PS. Beide trieben gemeinsam die Vorderräder an. Eine Blei-Gel-Batterie im Heck speicherte die elektrische Energie.

Der Preis pro Fahrzeug betrug 60.000 DM. Aufgrund der geringen Nachfrage wurde die Produktion 1998 eingestellt.

Die erfolgreiche Serieneinführung der Hybridtechnik bei Personenkraftwagen gelang Toyota mit dem Modell Prius im Oktober 1997 in Japan. 2001 wurde in Amerika und Europa eine überarbeitete Version des Prius der ersten Generation eingeführt.

⁷ <http://www.motorlexikon.de/...../?I=9480&R=H> (05.10.2010)

⁸ Vgl. Hofmann 2010, S. 10

⁹ Vgl. <http://www.audi.de/de/brand/de.html> (30.08.2010)

Weltweit wurden mittlerweile bereits zwei Millionen Prius verkauft. 200.000 davon in Europa. Das Toyota Prius-Hybridantriebskonzept wurde laufend verbessert.



Bild 1.4 – Hybridfahrzeug Toyota Prius 3. Quelle: Toyota ¹⁰

Derzeit ist die dritte Generation am Markt erhältlich. Ab 2012 wird auch eine Plug-In-Version mit an der Haushaltssteckdose aufladbarer Lithium-Ionen-Batterie erhältlich sein.

Der Hybridantrieb hat aufgrund seines Potentials zur Verbrauchsreduzierung, zunehmender Umweltprobleme, politischen und gesetzgeberischen Randbedingungen einen erwähnenswerten Marktanteil zu erreichen.¹¹

Im folgenden werden die Möglichkeiten der Leistungsübertragung in Hybridfahrzeugen beschrieben bzw. aufgezeigt. Der Schwerpunkt liegt bei den allgemeinen Ansätzen und Zusammenhängen und nicht auf Detaillösungen.

Sonstige alternative Antriebe, z.B. der Brennstoffzellenantrieb, reiner elektrischer Antrieb und alternative Kraftstoffe werden nur soweit behandelt, als sie zum besseren Verständnis und Unterscheidungen bei den Hybridantrieben dienen.

3. Kraftfahrzeughybridantriebe

3.1 Prinzip

Hybrid ist lateinisch und bedeutet „von zweierlei Herkunft“. Unter einem Hybridfahrzeug versteht man ein Fahrzeug, das mindestens zwei unterschiedliche Antriebe und Energiespeicher kombiniert. Häufigste Variante ist derzeit der gleichzeitige Einsatz eines Otto-Verbrennungsmotors oder Diesel-Verbrennungsmotors mit mindestens einem Elektromotor und zwei unterschiedlichen Energiespeichern, Kraftstofftank und Traktionsbatterie (Akkumulator, Hochvoltbatterie, Batterie).

¹⁰ <http://www.toyota.de/index.aspx/...../gallery.aspx> (14.09.2010)

¹¹ Vgl. Hofmann 2010, S. 14

Es sind aber eine Reihe weiterer Möglichkeiten möglich. Die Brennstoffzelle, die Gasturbine, der Wankelmotor, der Stirlingmotor und der Hydraulikmotor. Keines dieser Systeme hat bisher allerdings größere Bedeutung erlangt.

Der elektrische Antrieb für Personenwagen ist dagegen schon seit über 110 Jahren bekannt. Der Grund für seine geringe Verbreitung in Straßenfahrzeugen liegt in der kleinen Energiedichte seines Energiespeichers, der Batterie.

Für die weitere Diskussion der verschiedenen Hybridfahrzeugkonzepte soll davon ausgegangen werden, dass es sich bei den zwei Antriebssystemen um einen Otto- oder Diesel-Verbrennungsmotor und mindestens einen Elektromotor handelt.

3.2 Ziel des Hybridantriebes

Der Grundgedanke des Hybridantriebs ist die Kombination zweier mit Vor- und Nachteilen behafteten Antriebssysteme, so dass jeweils nur die Vorteile zum Tragen kommen.

Das wichtigste Ziel für den Bau von Kraftfahrzeugen mit Hybridantrieb ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen um die steigenden Anforderungen der Gesetzgeber und Kraftfahrzeughalter weiterhin erfüllen können.

Durch die Kombination von Verbrennungsmotoren mit Elektromotoren, sogenannte elektrische Hybridantriebe, soll vor allem der fossile Kraftstoffverbrauch und die Emissionen (CO_2) durch den Einbau von Motoren mit reduzierter Leistung und den Betrieb des Verbrennungsmotors ohne oder mit Unterstützung des Elektromotors in Bereichen besten Wirkungsgrades weiter gesenkt werden.

Abhängig vom Hybridantriebskonzept ergeben sich auch zusätzliche Funktionalitäten wie rein elektrisches Fahren, mehr Drehmoment und Leistung („Fahrspaß“), teilweise Elektrifizierung des Allradantriebsstranges (intelligente Torque-Vektoring-Systeme), automatisches oder vom Fahrer aus gesteuertes rein elektrisches fahren, regeneratives Bremsen mit dem Elektromotor/Generator.¹²

3.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Auf dem wichtigsten Hybridmarkt, den USA (Kalifornien), sind neben den Zero-Emission Vehicles (ZEVs) auch Hybridfahrzeuge in der Gesetzgebung verankert. Dabei wird eine Quote von Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeugen (ZEVs), Hybridfahrzeugen und Fahrzeuge mit bestimmter fortschrittlicher Technologie der Neuwagenflotte von größeren Herstellern vorgeschrieben. Bei der Nichterfüllung dieser Quoten drohen Strafzahlungen.¹³

¹² Vgl. Bosch (3) 2008, S. 4

¹³ Vgl. Hofmann 2010, S. 57 ff

In Europa und Japan sind derzeit noch keine speziellen gesetzlichen Regelungen für Hybridfahrzeuge in Kraft, ausgenommen die CO₂ Ziele.

In den EU Staaten gilt für PKW ab 2012 ein Zielwert für den Flottenverbrauch in der Höhe von 120 g CO₂ pro Kilometer für die Durchschnittsemission aller EU-weit neu zugelassenen Pkw.

Dabei müssen 130 g CO₂/km auf der Antriebsseite realisiert werden. 5 g CO₂/km über höhere Biokraftstoffquoten, 5 g CO₂/km über Leichtlaufreifen, Schaltpunktanzeige, Reifendruckkontrolle und effiziente Klimaanlage.

Beim Wert 130 g CO₂/km wird zusätzlich noch das Gewicht der Fahrzeuge nach Gleichung (1) berücksichtigt. Diese Vorgangsweise verhindert die Bevorteilung von Kleinfahrzeugen.

$$\boxed{\text{Max. zulässige CO}_2\text{-Emissionen} = 130 + a \cdot (M - M_0)} \quad (1)$$

M ... Masse des Kraftfahrzeuges in Kilogramm (kg)

M_0 ...Basisgewicht = 1372, 0 kg

aFaktor = 0,0457

Neben der EU-Verordnung zum CO₂-Flottenausstoß gibt es in Europa noch nationale Besteuerungssysteme, Gebührensysteme, Einfahrverbote (z.B. London) die sich am CO₂ - bzw. Schadstoffausstoß orientieren.

Für den Einsatz von Hybridfahrzeugen in den USA wie auch in Europa gilt, dass sie nicht so recht in die heutigen gesetzlichen Vorschriften hineinpassen. Für Hybridantriebe müssen neue Verordnungen geschaffen werden, die die Betriebsweise im Testzyklus exakt vorschreiben.¹⁴

¹⁴ Vgl. Hofmann 2010, S. 65 f

4. Betriebsarten

Verbrennungsmotor und Elektromotor tragen je nach Betriebszustand und gefordertem Drehmoment in unterschiedlichem Maße zur Antriebsleistung bei. Ein Elektromotor kann schon bei niedrigen Drehzahlen ein konstantes Drehmoment abgeben. Das Drehmoment eines Verbrennungsmotors steigt erst bei mittleren Drehzahlen an. Der Elektromotor ergänzt dadurch ideal den Verbrennungsmotor. Bei ausreichender Batterieladung können sie zusammen für alle Fahrsituationen ein hohes Antriebsdrehmoment zur Verfügung stellen.

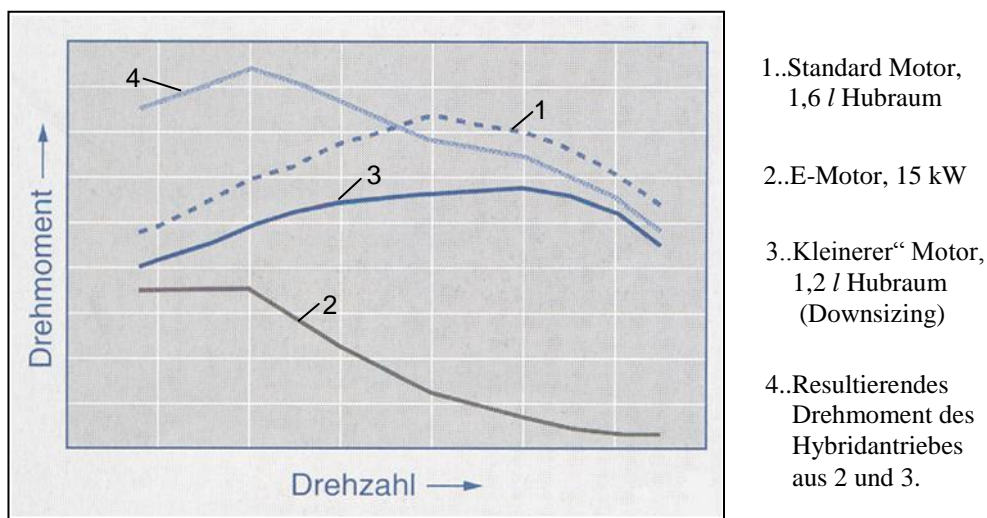


Abb. 4.1 – Drehmomentverlauf Hybridantrieb zu Standardantrieb mit Verbrennungsmotor.¹⁵

Die Hybridsteuerung legt die Drehmomentenaufteilung zwischen beiden Antrieben durch eine geeignete Betriebsstrategie fest.

Die unterschiedlichen Betriebsmodi bei Hybridfahrzeugen werden durch die Art des Zusammenwirkens von Verbrennungsmotor, Elektromotor (n) und Energiespeicher definiert.

Man unterscheidet:

Hybrides Fahren, elektrisches Fahren, Boosten, Generatorbetrieb und rekuperatives Bremsen.

4.1 Hybridisches Fahren

Hybrides Fahren bezeichnet alle Zustände, in denen sowohl Verbrennungsmotor als auch Elektromotor Antriebsmoment (Antriebsleistung) erzeugen.

Bei der Aufteilung des Antriebsmomentes durch die Hybridsteuerung wird nicht nur das Optimierungsziel niedriger Kraftstoffverbrauch und geringe Emissionen, sondern auch der Ladezustand des elektrischen Energiespeichers berücksichtigt.

¹⁵ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 5

4.2 Rein elektrisches Fahren

Beim rein elektrischen Fahren wird das Kraftfahrzeug über längere Strecken alleine durch einen oder mehrere Elektromotoren angetrieben. Der Verbrennungsmotor wird vom Elektromotor abgekoppelt und nicht mitgeschleppt.

Der rein elektrische Betriebsmodi ist nur bei Vollhybridfahrzeugen über längere Strecken (derzeit ca. 2-20 km) möglich. In diesem Betriebsmodus kann emissionsfrei und geräuscharm gefahren werden.

Serienbeispiel:

Mit dem Toyota Prius III, Modell 2010, kann abhängig vom Ladezustand der Traktionsbatterie und der Fahrgeschwindigkeit ($v_{\max} = 50 \text{ km/h}$) ca. 2 km rein elektrisch gefahren werden.

Segeln

Es ist ein Sonderfall des elektrischen Fahrens. Bei stehendem Verbrennungsmotor gibt auch die E-Maschine kein Moment für den Antrieb ab. Das Fahrzeug rollt ohne Antrieb.

4.3 Boosten

Im Boost-Betrieb geben Verbrennungsmotor und E-Maschine positive Antriebsmomente ab. Der Verbrennungsmotor wird in der Anfahr- oder Beschleunigungsphase durch den Elektromotor unterstützt (Boost-Funktion).

4.4 Generatorbetrieb

Im Generatorbetrieb wird der elektrische Energiespeicher aufgeladen. Dies kann bei Fahrzeugstillstand (LPA) oder beim Fahren der Fall sein. Zu diesem Zweck wird der Verbrennungsmotor wirkungsgradgünstig so betrieben, dass er eine größere Leistung abgibt, als für den gewünschten Vortrieb des Kraftfahrzeuges erforderlich ist (LPA). Der überschüssige Leistungsanteil wird vom Generator in elektrische Energie umgewandelt und im elektrischen Energiespeicher gespeichert. Auch im Schubbetrieb kann der nicht vollgeladene Energiespeicher über den Generator aufgeladen werden.

(LPA...Lastpunktanhebung im Stillstand oder während der Fahrt, siehe Kapitel 6.1.1.)

4.5 Regeneratives Bremsen

Regeneratives Bremsen wird auch als rekuperatives Bremsen oder als Rekuperation bezeichnet. Beim regenerativen Bremsen bzw. Verzögern wird ein Teil der kinetischen Energie des bewegten Kraftfahrzeuges beim Bremsen oder im Schubbetrieb in elektrische Energie umgewandelt und dem nicht vollgeladenen Energiespeicher oder Verbrauchern zugeführt.

Das Kraftfahrzeug wird entweder alleine durch die Bremswirkung des als Generator arbeitenden Elektromotors oder von diesem und der Betriebsbremse (Gleitreibung) abgebremst.

- **Serielle Rekuperation:**
Bis zu einer Grenzggeschwindigkeit wird rein generatorisch gebremst. Unterhalb dieser nur mit der Reibungsbremse.
- **Parallele Rekuperation:**
Verzögern mit Reibungs- und Generatorbremse.

Der Übergang zwischen Generator und Reibungsbremse soll möglichst weich sein und wird als Blending bezeichnet. Wenn der Verbrennungsmotor abgekoppelt werden kann, kann der Motorschleppmomentanteil auch für die Rekuperation genutzt werden.

4.6 Wirkungsgrad bei der Rekuperation

Bedingung für die Rekuperation ist ein ladbarer Energiespeicher. Die theoretisch mögliche Rekuperationsenergie kann nur teilweise genutzt werden. Der Wirkungsgrad von der Energieaufnahme bis zur Energieabgabe an den Antriebsrädern (Generator, Umrichter, Traktionsbatterie, Antriebsmotor) beträgt inklusive Energiespeicherung für einen Mittelklasse-PKW nur ca. 0,5 (50 %). Die Kraftstoffersparnis beträgt nur ca. 4-5 %. Sie ist bei PKW geringer als vielfach angenommen oder zitiert.¹⁶

4.7 Start/Stopp-Funktion

Hybridfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren verfügen in der Regel über eine automatische Start/Stopp-Funktionalität die über eine Elektromaschine (Elektromotor-Generator) realisiert ist. Beim Stillstand des Fahrzeugs (Ampel oder Stau) wird der Verbrennungsmotor abhängig von bestimmten Bedingungen wie z.B. Fahrgeschwindigkeit Null, kein Gang eingelegt, automatisch abgeschaltet. Sowie die Kupplung (Bremspedal, Gaspedal) betätigt wird, wird der Motor automatisch und ohne spürbare zeitliche Verzögerung gestartet.

Sparsame konventionelle Personenkraftwagen können auch mit einem Start/Stopp-System mit verstärktem Elektrostarter, zyklenfester 12 V-Batterie, Batteriesensor und angepasster Motorsteuerung ausgestattet sein.

Durch ein Start-Stopp-System können bei einem Hybrid- und konventionellem Kraftfahrzeug ca. 3,5 bis 4 % Kraftstoff eingespart werden.¹⁷

¹⁶ Vgl. Hofmann 2010, S. 85

¹⁷ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 5 f

5. Einteilung der Hybridantriebe

Üblicherweise werden Hybridantriebe nach der Art der Antriebskonfiguration oder nach dem Hybridisierungsgrad (H) eingeteilt.¹⁸

5.1 Einteilung nach der Antriebskonfiguration

Entsprechend der Grundstrukturen der Kombination von Verbrennungsmotor, E-Maschine, Generator, Batterie und Getriebe können Hybridfahrzeuge wie folgt eingeteilt werden:

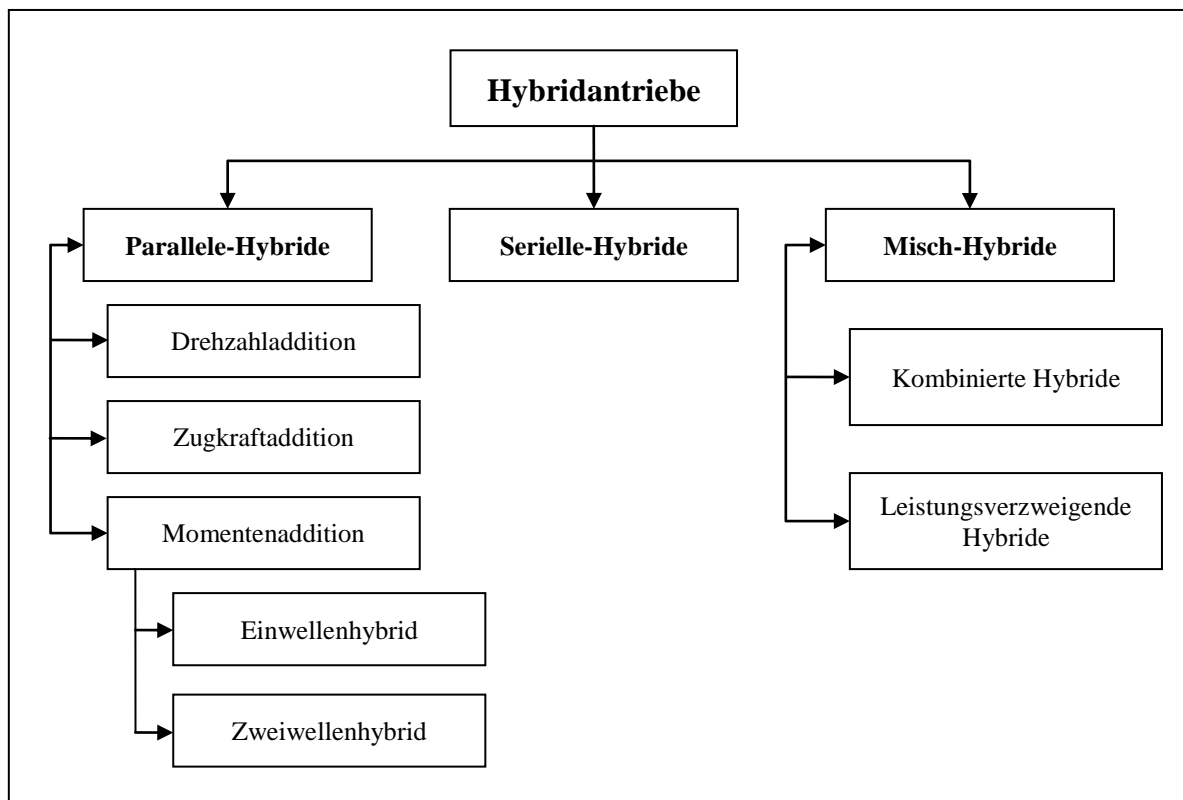


Abb. 5.1 – Hybridfahrzeuge, Einteilung nach der Antriebskonfiguration.¹⁹

Es werden drei Grundstrukturen unterschieden:²⁰

- Serieller-Hybridantrieb
- Paralleler-Hybridantrieb
- Misch-Hybridantrieb

Zu beachten ist, dass sich die Einteilung auf den mechanischen und elektrischen Energiefluss und nicht auf die geometrische Anordnung der Einzelkomponenten bezieht.

¹⁸ Vgl. Hofmann 2010, S. 17 f

¹⁹ Vgl. Kirchner 2007, S. 565

²⁰ Vgl. Rolf Isermann, 2010 S. 27 f

5.1.1 Serieller-Hybridantrieb

Der serielle Hybridantrieb besteht aus einem Verbrennungsmotor, der mit einem Generator gekoppelt ist. Der Fahrzeugantrieb erfolgt über einen Elektromotor. Der Verbrennungsmotor hat keine mechanische Verbindung zur Antriebsachse.

Die Antriebskomponenten sind „elektrisch“ in Serie geschaltet, siehe Abb. 5.2.

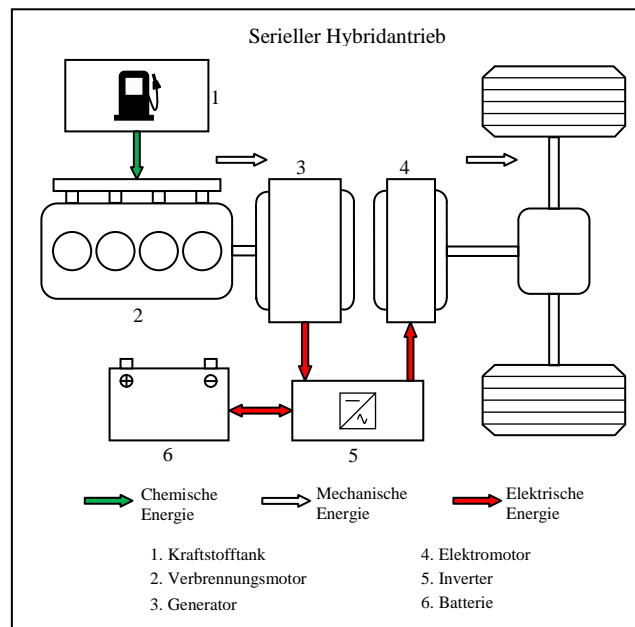


Abb. 5.2 - Serieller Hybridantrieb.²¹

Die vom Verbrennungsmotor und Generator erzeugte elektrische Energie dient für den Antrieb und das Nachladen der Batterie.

Die Bewegungsenergie des Verbrennungsmotors wird von einem Generator in elektrische Energie umgesetzt. Der Inverter (Pulswechselgleichrichter) wandelt die Leistung gemäß Fahrerwunsch und versorgt den Elektromotor, der für den Antrieb der Räder verantwortlich ist. Die Leistung, die zur Bewegung des Fahrzeugs erforderlich ist, wird ausschließlich vom Elektromotor auf die Antriebswellen übertragen.

Für eine gewünschte Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs muss der Antriebselektromotor so groß dimensioniert werden, dass er diese Leistung auch kontinuierlich abgeben kann. Die Leistung muss vom Verbrennungsmotor und vom Generator direkt erzeugt werden. Wegen der Umwandlungsverluste müssen diese größer dimensioniert werden. Die auf Höchstleistung ausgelegte Ladegruppe führt bei langsamer Fahrt und im Stadtverkehr zu höherem Kraftstoffverbrauch, weil nicht alle erzeugte Energie direkt für den Antrieb benötigt, sondern ein erheblicher Anteil im Batteriesystem zwischengespeichert wird.

²¹ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 10

Vorteile:

- Die Verbrennungskraftmaschine und der Generator (Ladegruppe) können unabhängig vom Radantrieb geregelt werden.
- Der Verbrennungsmotor kann überwiegend stationär bei bestem Wirkungsgrad betrieben werden. Dies führt zu einem geringen Kraftstoffverbrauch und geringeren Emissionen. Siehe Lastpunktanhebung im Kapitel 6.1.1
- Abschaltstrategie
Abhängig von Fahrgeschwindigkeit (Stadt) und Batterieladezustand.
- Vorkonditionierung des Verbrennungsmotors und des Katalysatorsystems möglich.
Z.B. Elektrisch anfahren, Motor über das Kühlsystem elektrisch erwärmen und anschließend starten. Intermittierender Betrieb während des Fahrens.
- Platzierungsvorteile der Bauteile durch die elektrische Koppelung der Ladegruppe mit der Antriebseinheit.
- Die großen, leistungsfähigen Elektromotoren ermöglichen ein starkes regeneratives Bremsen, d.h. es können starke Fahrzeugverzögerungen rekuperiert werden.

Nachteile:

Durch die vielen Energieumwandlungen entstehen hohe Energieverluste, da jede Energieumwandlung wirkungsgradbehaftet ist. Daraus resultiert ein höherer Kraftstoffverbrauch als beim konventionellen Direktantrieb.

Abb. 5.3 zeigt einen Extremfall mit 11 Energieumwandlungen. Dies sind 5 mehr als bei einem vergleichbaren konventionellen Pkw-Serienantriebsstrang.

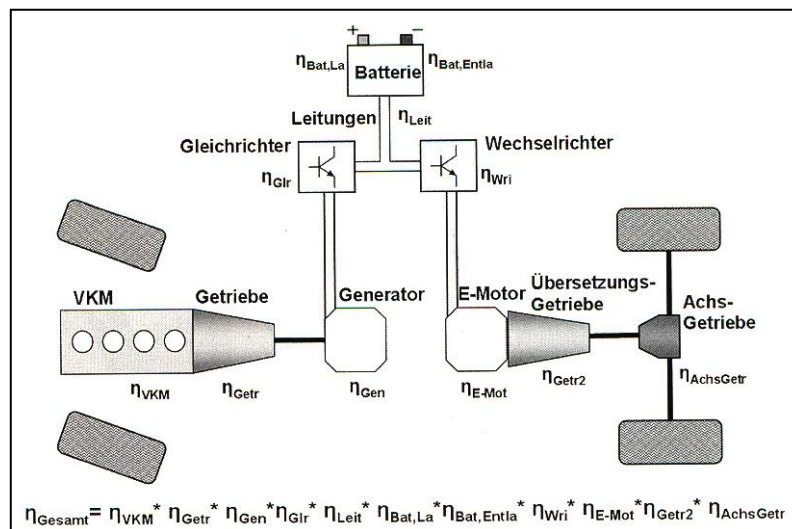


Abb. 5.3 – Wirkungskradkette bei einem Serienhybrid.²²

Die Kraftstoffverbrauchersparnis durch den Betrieb des Verbrennungsmotors im Verbrauchsoptimalen Bereich, kann leicht durch die elektrischen und chemischen Energieumwandlungsverluste aufgezehrt, d.h. neutralisiert oder übertroffen werden.

²² Vgl. Hofmann 2010, S. 21

Besonders wenn viel Energie in der Batterie chemisch zwischengespeichert werden muss, ist aufgrund der schlechten Ladungswirkungsgrade mit höherem Kraftstoffverbrauch zu rechnen. Intelligente Betriebsstrategien müssen gegensteuern um die Verluste zu minimieren.

Ein großer Fortschritt wurde diesbezüglich mit dem Einsatz von Li-Ionen-Batteriesystemen erreicht. Diese weisen deutlich geringere Be- und Entladeverluste auf, wodurch serielle Hybridkonzepte auch für PKW Anwendungen attraktiver werden.

Anwendung:

Aufgrund der mehrfachen Energieumwandlung wird diese Hybridstruktur bei Pkw nicht angewendet. Der serielle Hybridantrieb wird z. B. bei Bussen, die im Stadtverkehr mit großem Stop-and-Go-Anteil fahren, eingesetzt.²³

5.1.1.1 Plug-In-Hybridfahrzeuge mit Range Extender

Wenn das Serienhybridkonzept in einem Plug-In-Hybridfahrzeug angewendet wird, kann die Ladegruppe auch wesentlich kleiner dimensioniert werden als der Elektroantriebsmotor, da sie nur zur Reichweitenerhöhung eingesetzt wird. Man spricht dann von einem „Range Extender“.

Während der ersten Fahrtkilometer wird der Strom aus einer Batterie (Li-Ionen) entnommen. Bei abnehmendem Ladezustand des Batteriesystems springt der Verbrennungsmotor mit gekoppeltem Generator automatisch an und liefert Strom für den Antrieb und das Laden des Batteriesystems. Bei Fahrzeugstillstand kann das Batteriesystem zusätzlich an der Haushaltssteckdose oder an dafür vorgesehen Ladestationen geladen werden.

Der Verbrennungsmotor und der Generator (Ladegruppe) kann in diesem Fall nicht die elektrische Energie erzeugen, die für eine kontinuierliche Höchstgeschwindigkeit nötig wäre. Sie liefern nur eine Durchschnittsleistung für den Stadtbetrieb. Leistungsspitzen werden von dem Batteriesystem abgedeckt.

Die Hauptenergie zur Fortbewegung wird über extern am Stromnetz aufgeladene Batterien bereitgestellt (Plug-In-Hybridfahrzeuge). Diese Auslegung vermeidet den Teillastbetrieb der Ladegruppe. Sie wird in einem verbrauchs- und emissionsgünstigen Lastpunkt betrieben.²⁴

Die Plug-In-Variante kann auch beim parallelen- und leistungsverzweigten Voll-Hybrid-Fahrzeugen angewendet werden, siehe Kapitel 5.2.3.

²³ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 10 f

²⁴ Vgl. Hofmann 2010, S. 20 f

5.1.1.2 Hybridisierter Brennstoffzellenantrieb

Auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen mit zusätzlichem elektrischen Energiespeicher handelt es sich im weiteren Sinne um serielle Hybride, da die mit der Brennstoffzelle erzeugte elektrische Energie nicht vollständig für den Fahrantrieb genutzt, sondern zumindest teilweise zwischengespeichert wird.

Hybridisierte Brennstoffzellen-Fahrzeuge haben als Antrieb einen Elektromotor, der von einem Brennstoffzellensystem mit elektrischer Energie versorgt wird.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist die Traktionsbatterie, in der elektrische Energie aus der Brennstoffzelle oder aus der Rekuperation zwischengespeichert wird.²⁵

²⁵ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 58

5.1.2 Paralleler Hybridantrieb

Beim parallelen Hybridantrieb können der Verbrennungs- und Elektromotor einzeln oder durch mechanische Kopplung auch gemeinsam (parallel) zum Antrieb dienen. Der Elektroantrieb kann nach Belieben zu- oder abgeschaltet werden.

Der Elektromotor ist zwischen Verbrennungsmotor und Radantrieb angeordnet und arbeitet entweder als Antriebsmotor oder lädt als Generator eine Batterie.

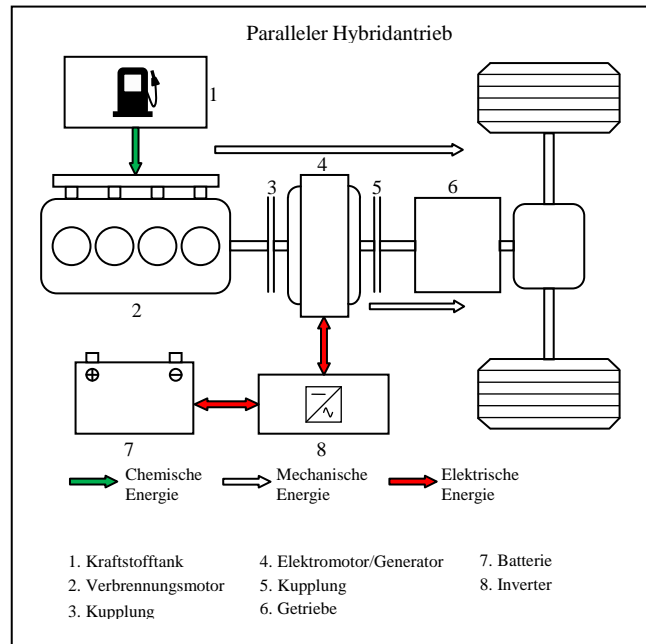


Abb. 5.4 - Paralleler Hybridantriebantrieb mit Kupplungen.²⁶

Der Verbrennungsmotor und der Elektromotor können über eine Kupplung oder Freilauf getrennt (entkoppelt) werden. Das Kraftfahrzeug kann dann rein elektrisch, verbrennungsmotorisch, oder gemischt betrieben werden.

Parallele Hybridkonzepte beinhalten neben dem Verbrennungs- und Elektroantriebsmotor mit den zugehörigen Energiespeichern ein und mehrere Getriebe, Kupplungen und Freiläufe.

Wenn der Elektromotor direkt mit der Kurbelwelle verbunden ist, wird dieser als Starter-Generator bezeichnet. Ein elektrisches Fahren ist nur mit Schleppverlusten des Verbrennungsmotors möglich.

Mit einer zweiten Kupplung, siehe Abb. 5.4, zwischen Schwungrad und Elektromotor ist ein elektrisches Fahren und regeneratives Bremsen ohne Schleppverluste möglich.

Leistungssummutation beim Parallelhybrid

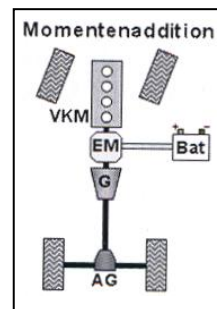
Die abgegebenen Leistungen der unterschiedlichen Antriebsmotoren können mechanisch unterschiedlich addiert werden.

²⁶ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 11 ff

Momentenaddition:

Der Verbrennungsmotor und der Elektromotor können direkt oder über eine Stirnradstufe bzw. Kette gekoppelt sein.

Die Drehmomente von Verbrennungsmotor und Elektromotor können frei verändert werden, während die Drehzahlen in einem festen Verhältnis zueinander stehen.



VKM...Verbrennungskraftmaschine

EM.....Elektromotor

BAT.....Batterie (Traktionsbatterie)

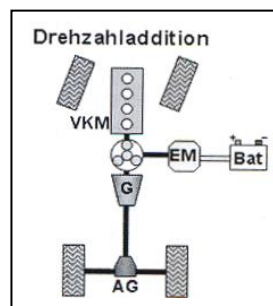
G.....Getriebe

AG.....Achsgetriebe

Abb. 5.5 - Paralleler Hybridantriebantrieb mit Momentenaddition.²⁷

Drehzahladdition

Die Leistungen der Motoren (Energiewandler) werden über ein Planetenradgetriebe zusammengeführt. Das Momentenverhältnis für die Übersetzung der Teilantriebsmomente ist durch die starren Übersetzungen des Planetenradgetriebes (Summengetriebe) vorgegeben. Die Drehzahlen können frei gewählt werden.



VKM...Verbrennungskraftmaschine

EM.....Elektromotor

BAT.....Batterie (Traktionsbatterie)

G.....Planetenradgetriebe

AG.....Achsgetriebe

Abb. 5.6 - Paralleler Hybridantriebantrieb mit Drehzahladdition.²⁸

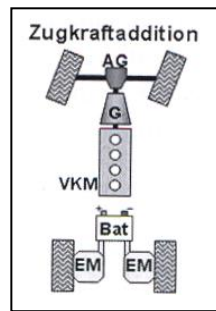
Zugkraftaddition

Bei der Zugkraftaddition wirken Verbrennungs- und Elektromotor auf unterschiedliche Antriebsachsen. Die verfügbaren Vortriebskräfte an den Antriebsrädern werden ohne mechanische Verbindung der beiden Antriebe am Rad genutzt. Physikalisch gesehen handelt es sich ebenfalls um eine Momentenaddition.²⁹

²⁷ Vgl. Hofmann 2010, S. 17

²⁸ Vgl. Hofmann 2010, S. 17

²⁹ Vgl. Kirchner 2007, S. 566



VKM...Verbrennungskraftmaschine
EM.....Elektromotor
BAT.....Batterie (Traktionsbatterie)
G.....Planetenradgetriebe
AG.....Achsgetriebe

Abb. 5.7 - Paralleler Hybridantriebantrieb mit Zugkraftaddition.³⁰

Bei der Zugkraftaddition ist auch eine Kombination verschiedener Hybridsysteme pro Fahrzeug möglich. Beim Toyota Lexus RX400h wirken auf die Vorderachse ein leistungsverzweigter Hybridantrieb und auf die Hinterachse ein Elektroantrieb.³¹

Bei den parallelen Hybriden mit Momentenaddition wird auch zwischen Ein- und Zweiwellensystemen unterschieden.

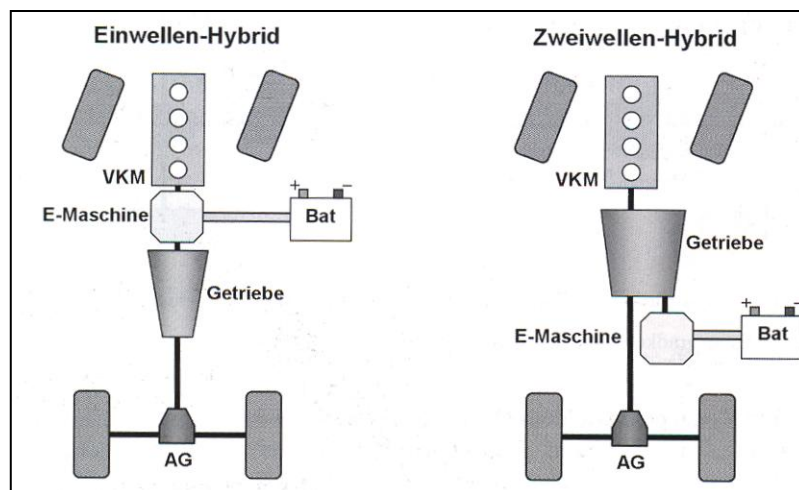


Abb. 5.8 - Ein- und Zweiwellen Hybridantriebsysteme.³²

Einwellenhybrid

Es wirken beide Energiewandler auf die Getriebeeingangswelle.

Zweiwellenhybrid

Der Verbrennungsmotor und der Elektromotor sind auf unterschiedlichen Wellen angeordnet (Getriebeeingangs- und Ausgangswelle).

Eine Abgrenzung ist hier nicht immer eindeutig möglich.

³⁰ Vgl. Hofmann 2010, S. 17

³¹ Vgl. Hofmann 2010, S. 263

³² Vgl. Hofmann 2010, S. 22

Vorteile des Parallelhybridantriebes:

Der konventionelle Antriebsstrang kann in weiten Bereichen beibehalten werden. Dies wirkt sich sowohl auf Bauraum und Fahrzeugherstellung als auch auf das gewohnte Fahrverhalten und die Kundenakzeptanz positiv aus.

Es wird nur ein Elektromotor benötigt. Er arbeitet wahlweise als Antriebsmotor oder Generator.

Die Dimensionierung der Antriebskomponenten kann besser gestaltet werden, da sich die Auslegung des Verbrennungsmotors (VKM) an der Höchstgeschwindigkeit orientiert und die der elektrischen Komponenten am Stadtbetrieb orientieren kann.

Dimensionierungsmöglichkeiten:

- Große VKM, kleiner elektrischer Antrieb.
- Kleine VKM, großer elektrischer Antrieb.
- Der Einbau von Verbrennungsmotoren mit reduzierter Leistung ist möglich.

Bei geschlossener Kupplung ist eine rein mechanische Kraftübertragung vom Verbrennungsmotor auf die Antriebsachse möglich, unabhängig vom Zustand der E-Maschine. Der Gesamtwirkungsgrad liegt dadurch vor allem bei höheren Geschwindigkeiten höher als bei den anderen Hybridantriebsstrukturen. Es fallen die elektrischen Umwandlungsverluste weg.

Der parallele Hybridantrieb hat das höchste Potential für das Erzielen eines geringen Kraftstoffverbrauchs.

Nachteile Parallelhybridantriebes:

Die direkte Anbindung der E-Maschine an den Verbrennungsmotor wirkt sich nachteilig auf die Wahlfreiheit des Betriebspunktes aus, da die Drehzahlen beider Antriebsmaschinen durch die Getriebeübersetzung und die Fahrgeschwindigkeit festgelegt sind. Diese können durch eine Getriebeschaltung verändert werden, jedoch nur für beide Aggregate in gleicher Weise. Bei der Verwendung eines Stufengetriebes kann die Drehzahl des Antriebsverbunds aus E-Maschine und Verbrennungsmotor also nicht kontinuierlich frei gewählt werden.

Serienanwendung:

Beim Honda Civic Hybrid wird ein paralleles Hybridkonzept verwendet. Die Herstellerbezeichnung lautet Integrated Motor Assist (IMA).

Auch beim Mercedes S400 Hybrid und beim VW Touareg Hybrid wird ein paralleles Hybridkonzept verwendet.

5.1.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Der leistungsverzweigende Hybridantrieb ist eine Kombination aus der seriellen und parallelen Hybridstruktur. Diese Antriebsstruktur wird vom derzeitigen Marktführer bei Hybrid-PKW, Toyota eingesetzt.

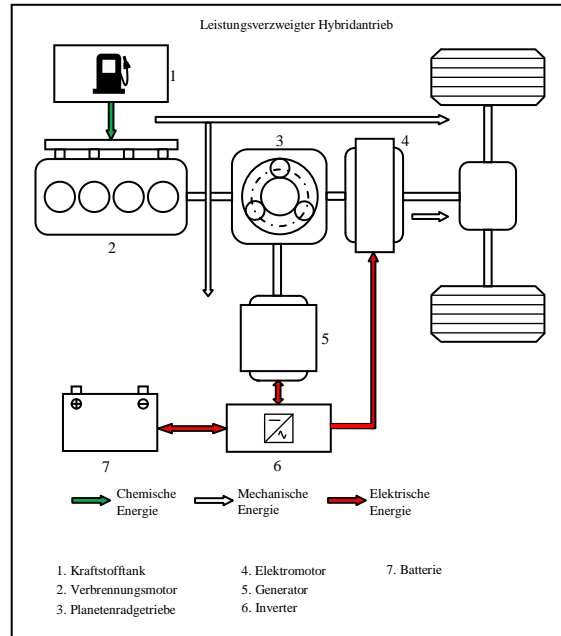


Abb. 5.9 - Leistungsverzweigter Hybridantriebsantrieb.³³

Leistungsverzweigte Hybridkonzepte teilen die Antriebsleistung so auf, dass der Hauptteil der vom Verbrennungsmotor abgegebenen Leistung mechanisch mit gutem Wirkungsgrad und ein geringerer Teil elektrisch mit schlechterem Wirkungsgrad übertragen wird.

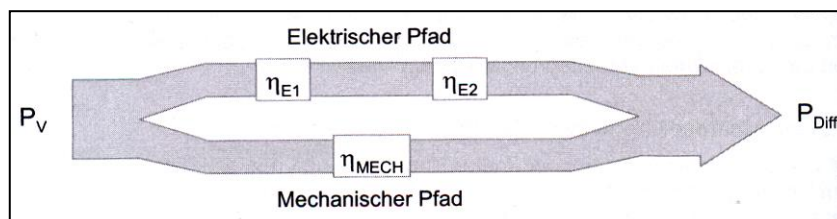


Abb.: 5.10 - Leistungsfluss im Antriebsstrang in einem leistungsverzweigten Getriebe.³⁴

P_V Leistung der Verbrennungskraftmaschine

η_{E1} ... Wirkungsgrad der E-Maschine E1 (Generator)

η_{E2} ... Wirkungsgrad der E-Maschine E2 (Elektroantriebsmotor)

P_{Diff} ...Getriebeausgangsleistung zum Achsantrieb (Differenzial)

³³ Vgl. Bosch 2008 (3), S. 14 f

³⁴ Vgl. Schäfer 2007, S. 14

Kernelement des Antriebstranges ist ein nach dem Verbrennungsmotor angebrachtes leistungsverzweigendes Getriebe mit zwei elektrischen Maschinen (E-CVT*), bei der die Maschinen in Verbindung mit einem Radsatz (ein oder mehrere Planetenradsätze), die Aufgabe eines Variators übernehmen.

(*E-CVT Electrical Continuously Variable Transmission (elektrisches stufenloses Getriebe))

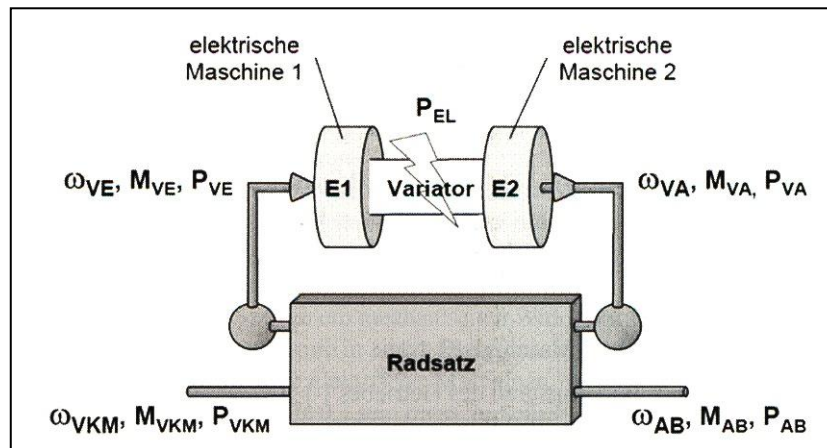


Abb. 5.11 - Aufbau eines elektrisch leistungsverzweigenden Getriebes.³⁵

Im leistungsverzweigenden Getriebe wird die Leistung des Verbrennungsmotors auf zwei Pfade aufgeteilt. Das Planetengetriebe erlaubt einen Teil der Leistung des Verbrennungsmotors mechanisch an den Abtrieb und den anderen Teil an einen Generator (E1) in einem konstanten Verhältnis abzugeben.

Das leistungsverzweigte Getriebe erlaubt eine stufenlos einstellbare Übersetzung zwischen der Verbrennungskraftmaschine und der Abtriebswelle, ähnlich einem stufenlosen Automatik-Getriebe auch CVT Getriebe genannt (Continuously Variable Transmission).

Eine direkte Drehmomentabgabe des Verbrennungsmotors an die Abtriebswelle ist wegen des Planetengetriebes nur möglich, wenn der Elektromotor E1 als Generator Leistung aufnimmt.³⁶

Die Generatorleistung muss dann direkt an den Elektromotor und zum Abtrieb abgegeben werden, oder kann zum Teil zum Laden der Batterie verwendet werden.

Der Antrieb des KFZ erfolgt im Hybridbetrieb kombiniert über die Verbrennungskraftmaschine und den Elektromotor.

Beim elektrisch leistungsverzweigenden Getriebe wird von der besonderen Eigenschaft des Variators Gebrauch gemacht, bei Stillstand einer der beiden E-Maschinen, nur eine geringe elektrische Leistung zu übertragen.

³⁵ Vgl. Schäfer 2007, S. 14

³⁶ Vgl. Müller 1998, S. 21

Single-Mode-Concept (ein stufenlos einstellbarer Betriebsbereich)

Die einfachste Struktur eines leistungsverzweigten Getriebes stellt die in Abb. 5.1 dargestellte Kombination eines antriebsseitig angeordneten Planetensatzes mit 2 elektrischen Maschinen dar, wobei der Variatorausgang E2 mit dem Ausgang des Planetensatzes fest gekoppelt ist (ausgangsgekoppelt). Diese Kombination hat nur einen stufenlosen Fahrbereich.

Dieses Konzept wird auch beim derzeit meistverkauften Serienhybridfahrzeug, dem Toyota Prius und weiteren z.B. Toyota Auris eingesetzt..

Bei einem Leistungsverzweigten Getriebe mit den elektrischen Maschinen E1 und E2 wird die von der Verbrennungskraftmaschine bereitgestellte Leistung P_{VKM} im Falle reiner Leistungsteilung zu einem Teil über einen mechanischen Pfad mit **hohem** Wirkungsgrad η_{mech} und zum anderen Teil über den elektrischen Zweig mit **geringerem** Wirkungsgrad ($\eta_{E1} \cdot \eta_{E2}$) übertragen.

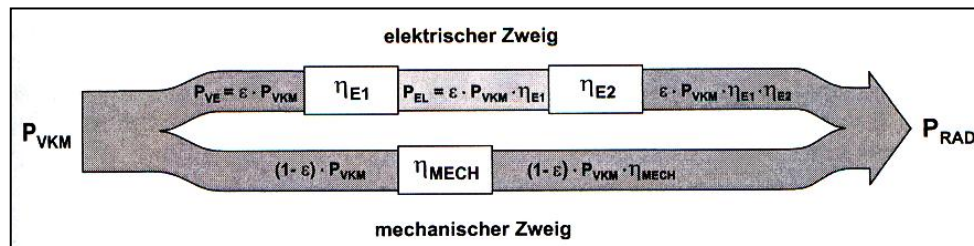


Abb. 5.12 - Leistungsfluss bei reiner Leistungsteilung.³⁷

Bei reiner Leistungsteilung erfolgt kein Energieaustausch mit dem Batteriesystem (Laden/Entladen) in Abhängigkeit von der Übersetzung des Radsatzes.

Die Aufteilung der Leistung erfolgt mit einem Planetenradgetriebe (Single Mode) oder einer Kombination von gekoppelten Planetenradgetrieben (Two Mode), welche die Eingangsleistung P_{VKM} des Getriebes auf die zwei Pfade aufteilen.

Das Verhältnis der von der elektrischen Maschine E1 generatorisch aufgenommenen Leistung P_{VE} zur Eingangsleistung P_{VKM} wird als Aufteilungsfaktor ε bezeichnet.

$$\varepsilon = \frac{P_{VE}}{P_{VKM}} \quad (2)$$

$$P_{VE} = \varepsilon \cdot P_{VKM} \quad (3)$$

³⁷ Vgl. Schäfer 2007, S. 113 ff

$P_{VE}...$ Mechanisch aufgenommene Leistung der E-Maschine E1 (kW)

P_{VKM} . Leistung der Verbrennungskraftmaschine

$\varepsilon.....$ Aufteilungsfaktor (--)

Die von der elektrischen Maschine E1 mechanisch aufgenommene Leistung wird umgewandelt und steht im elektrischen Zweig als elektrische Leistung P_{EL} zur Verfügung.

$$\boxed{P_{EL} = \varepsilon \cdot P_{VKM} \cdot \eta_{E1} = P_{VE} \cdot \eta_{E1}} \quad (4)$$

$P_{EL}....$ Übertragene elektrische Leistung im elektrischen Kreis (kW)

$\varepsilon.....$ Aufteilungsfaktor (--)

P_{VKM} . Leistung der Verbrennungskraftmaschine

$P_{VE}...$ Mechanisch aufgenommene Leistung der E-Maschine E1(kW)

$\eta_{E1}...$ Wirkungsgrad der E-Maschine E1 (--)

Durch die Energieumwandlung verringert sich die erzeugte elektrische Leistung P_{EL} im Vergleich zur mechanisch aufgenommenen Leistung um den Wirkungsgrad η_{E1} der elektrischen Maschine E1.

Mit weiteren Verlusten η_{E2} ist die Umwandlung der elektrischen Leistung an der elektrischen Maschine E2 in mechanische Leistung verbunden.

$$\boxed{P_{VA} = P_{EL} \cdot \eta_{E2} = P_{VE} \cdot \eta_{E1} \cdot \eta_{E2} = \varepsilon \cdot P_{VKM} \cdot \eta_{E1} \cdot \eta_{E2}} \quad (5)$$

$P_{VA}....$ Leistung am Variatorausgang

$P_{EL}....$ Übertragene elektrische Leistung im elektrischen Kreis (kW)

$P_{VE}...$ Mechanisch aufgenommene Leistung der E-Maschine E1(kW)

$\varepsilon.....$ Aufteilungsfaktor (--)

P_{VKM} . Leistung der Verbrennungskraftmaschine

$\eta_{E1}...$ Wirkungsgrad der E-Maschine E1 (--)

$\eta_{E2}...$ Wirkungsgrad der E-Maschine E2 (--)

Für die Bewertung leistungsverzweigter elektrischer Getriebe ist das Verhältnis ε_{EL} der zwischen den beiden E-Maschinen übertragenen elektrischen Leistung P_{EL} und der Getriebeeingangsleistung P_{VKM} von großer Bedeutung.

Mit diesem Verhältnis wird die nach der Energieumwandlung erzeugte elektrische Leistung ins Verhältnis zur mechanischen Antriebsleistung gesetzt. Sie ist ein Maß für die Belastung des Variators und bestimmt die Größe der elektrischen Maschinen.

$$\varepsilon_{EL} = \frac{P_{EL}}{P_{VKM}} = \frac{\varepsilon \cdot P_{VKM} \cdot \eta_{E1}}{P_{VKM}} = \varepsilon \cdot \eta_{E1} \quad (6)$$

ε_{EL} ... Verhältnis der elektrisch übertragenen Leistung zur der von der Verbrennungskraftmaschine abgegebenen Leistung

P_{EL} ... Übertragene elektrische Leistung im elektrischen Kreis (kW)

P_{VKM} Leistung der Verbrennungskraftmaschine

η_{E1} ... Wirkungsgrad der E-Maschine E1 (--)

Der Gesamtwirkungsgrad des Getriebes kann vereinfacht als Summe der elektrischen und mechanischen Wirkungsgrade mit ihren Leistungsanteilen beschrieben werden.

$$P_{VKM} \cdot \eta_{GES} = (P_{VKM} - P_{VE}) \cdot \eta_{MECH} + P_{EL} \cdot \eta_{E2} \quad (7)$$

$$P_{VKM} \cdot \eta_{GES} = (1 - \varepsilon) \cdot P_{VKM} \cdot \eta_{MECH} + \varepsilon \cdot P_{VKM} \cdot \eta_{E1} \cdot \eta_{E2}$$

$$\eta_{GES} = (1 - \varepsilon) \cdot \eta_{MECH} + \varepsilon \cdot \eta_{E1} \cdot \eta_{E2}$$

$$\eta_{GES} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{EL}}{\eta_{E1}}\right) \cdot \eta_{MECH} + \varepsilon_{EL} \cdot \eta_{E2} \quad (8)$$

η_{GES} ... Gesamtwirkungsgrad

ε_{EL} ... Verhältnis der elektrisch übertragenen Leistung zur der von der Verbrennungskraftmaschine abgegebenen Leistung

η_{MECH} Mechanischer Wirkungsgrad des Getriebes

η_{E1} ... Wirkungsgrad der E-Maschine E1 (--)

η_{E2} ... Wirkungsgrad der E-Maschine E2 (--)

Die Verluste im mechanischen Zweig sind aufgrund des hohen Wirkungsgrades von Zahnradpaarungen prinzipiell geringer als die Verluste im elektrischen Zweig. Für die Erzielung eines hohen Systemwirkungsgrades sind somit niedrige Verluste der elektrischen Maschinen und der Wechselrichter sehr wichtig. Die Verluste können prinzipiell verringert werden, wenn die elektrische Leistung klein bleibt.

Ziel ist es daher den Faktor ε_{EL} so gering wie möglich zu halten. Aus voriger Gleichung lässt sich ableiten, dass der Faktor ε_{EL} bei einem mechanischen Wirkungsgrad von 99 % (mindestens eine Leistungsführende Zahnradstufe in einem Planetensatz) und einem Wirkungsgrad im elektrischen Zweig von 72 % (2 elektrische Maschinen mit einem Wir-

kungsgrad inkl. Umrichter von je 85%)³⁸ kleiner als 0,3 sein muss, um einen Gesamtwirkungsgrad von über 90 % zu erreichen.

Beispiel: $\varepsilon_{EL} = 0,3$, $\eta_{MECH} = 0,99$, $\eta_{E1} = 0,85$, $\eta_{E2} = 0,85$

$$\eta_{GES} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{EL}}{\eta_{E1}}\right) \cdot \eta_{MECH} + \varepsilon_{EL} \cdot \eta_{E2}$$

$$\eta_{GES} = \left(1 - \frac{0,3}{0,85}\right) \cdot 0,99 + 0,3 \cdot 0,85 = \underline{0,895}$$

Wenn ε_{EL} klein ist, nimmt der Getriebegesamtwirkungsgrad hohe Werte an. Eine Verringerung der elektrischen Leistung wirkt sich auf die Größe der elektrischen Maschinen und somit auf die Kosten und den Raumbedarf des Getriebes aus. Jede Zahnradstufe und Schaltelement senken den Getriebewirkungsgrad. Die Anzahl der mechanischen Elemente ist somit gering zu halten.

Bei dem zur Leistungsteilung verwendeten Planetenradgetriebe wird das Drehmoment am Planetenträger (STEG) stets in einem **konstanten** Verhältnis auf die Drehmomente von Sonnenrad- und Hohlrad aufgeteilt.³⁹

Bei Vernachlässigung von Trägheiten (stationäre Betriebspunkte) und Reibung gilt:

$$M_S = - \frac{z_S}{z_S + z_H} \cdot M_{ST} \quad (9)$$

$$M_H = - \frac{z_H}{z_S + z_H} \cdot M_{ST} \quad (10)$$

$$i_{St} = - \frac{z_H}{z_S} \quad (11)$$

M_S ...Drehmoment am Sonnenrad

M_{ST} ...Drehmoment am Steg

M_H ...Drehmoment am Hohlrad

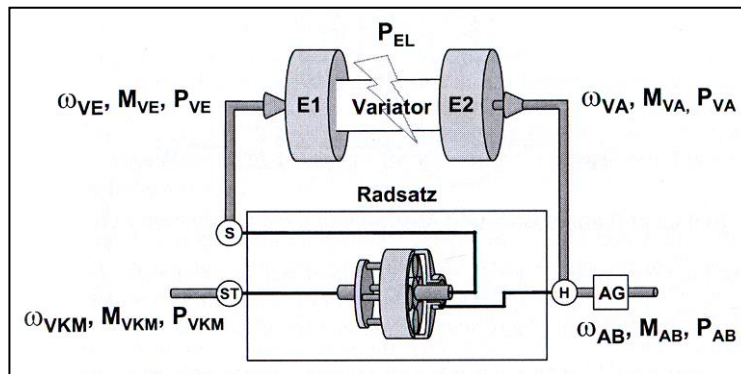
z_SZähnezahl des Sonnenrades

z_HZähnezahl des Hohlrades

i_{St}Standübersetzung

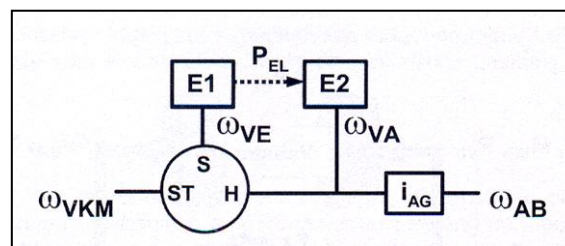
³⁸ Vgl. Schäfer 2007, S. 6

³⁹ Vgl. Hofmann 2010, S. 29 f

Abb. 5.13 – Elektrisch leistungsverzweigtes Getriebe.⁴⁰

VKM...
Verbrennungskraft-
maschine

ST...Steg,
S.....Sonnenrad
H.....Hohlrad

Abb. 5.14 – Wolfsches Schema des elektrisch leistungsverzweigten Getriebes.⁴¹

Die Übersetzung i des Radsatzes $i = \omega_{VKM}/\omega_{VA}$ kann je nach Drehzahlen der einzelnen Wellen stufenlos verändert werden. Mit dem konstanten Verhältnis des Generatormomentes M_{VE} (E-Maschine E1) zum Verbrennungsmotormoment M_{VKM} ergibt sich ein linearer Zusammenhang der elektrischen Leistung P_{EL} zur Eingangsleistung P_{VKM} über das inverse Übersetzungsverhältnis $1/i$.

$$i = \frac{\omega_{VKM}}{\omega_{VA}} \quad (12)$$

Für eine Hohlradzähnezahl $z_H = 78$ und Sonnenradzähnezahl $z_S = 30$, dies entspricht der Auslegung beim Toyota Prius, ergeben sich bei rein verbrennungsmotorischem Betrieb ohne Energieaustausch mit der Batterie nachstehend dargestellte Zusammenhänge:

$$i = \frac{\omega_{VKM}}{\omega_{VA}} = \frac{z_H}{z_S + z_H} = \frac{78}{30 + 78} = 0,722 \quad \frac{1}{i} = \frac{1}{0,722} = 1,38$$

ω_{VKM}Winkelgeschwindigkeit der Verbrennungskraftmaschine

ω_{VA}Winkelgeschwindigkeit am Variatorausgang

⁴⁰ Vgl. Schäfer 2007, S. 115

⁴¹ Vgl. Schäfer 2007, S. 116

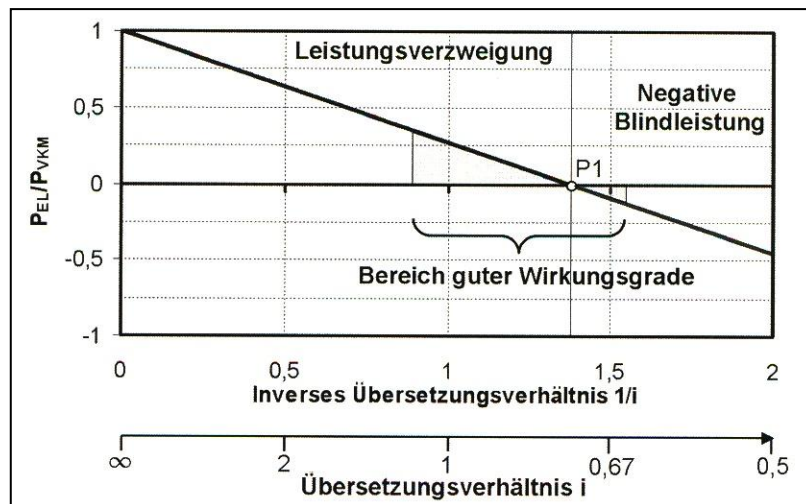


Abb. 5.15 - Verhältnis ϵ_{EL} der elektrischen Leistung zur Eingangsleistung P_{VKM} über das Übersetzungsverhältnis (Toyota Prius).⁴²

Im Punkt P1, wo die inverse Übersetzung $1/i$ den Wert $1/i = 1,38$ annimmt, steht die Variatorwelle bzw. die E-Maschine E1 ($\omega_{VE} = 0$). Es stellt sich ein Minimum der im elektrischen Pfad zu übertragenden Leistung ein. Die elektrische Maschine E1 am Variatoreingang erzeugt in diesem Zustand nur ein Haltemoment M_{VE} , welches um den Faktor $(1 + i_{Stand})$ kleiner ist als das vom Verbrennungsmotor abgegebene Moment M_{VKM} .

$$M_{VE} = - \frac{z_S}{z_S + z_H} \cdot M_{ST} \quad (13)$$

$$M_{VKM} = M_{ST} = -(1 + i_{Stand}) \cdot M_{VE} \quad (14)$$

M_{VE} Drehmoment am Variatoreingang

M_{VKM} ...Drehmoment der Verbrennungskraftmaschine

M_{ST}Drehmoment am Steg

i_{Stand}Standübersetzung (z_H/z_S)

M_{VE}Drehmoment am Variatoreingang (Generator) = Haltemoment

Je weiter die Übersetzung von der Übersetzung im Punkt P1 (rein mechanische Übertragung) abweicht, desto mehr elektrische Energie muss über den wirkungsgradungünstigeren elektrischen Pfad übertragen werden. Dies erfordert auch eine entsprechende Dimensionierung der elektrischen Maschinen und damit Gewicht und Platzbedarf.

Oberhalb des Punktes P1 erfolgt eine Drehrichtungsumkehr von der E-Maschine E1, die dann vom generatorischen in den motorischen Betrieb wechselt. Es zirkuliert Energie vom

⁴² Vgl. Hofmann 2010, S. 31

mechanischen über den elektrischen Pfad im Getriebe. Diese wird als Blindleistung bezeichnet. Sie wirkt sich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad aus.

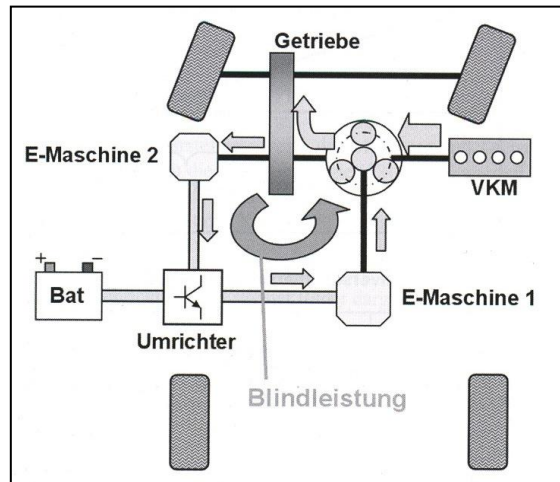


Abb. 5.16 – Schema des Blindleistungsflusses beim Toyota Prius.⁴³

Es ist daher sehr wichtig, dass eine Getriebeabstimmung gewählt wird, bei welcher der am meisten genützte Fahrbetriebsbereich sich in der Nähe von P1 befindet. Dies ist jedoch in weiten Bereichen nicht möglich.

Da das elektrische Fahren mit zweifachen Energieumwandlungsverlusten verbunden ist und ein optimaler Betrieb über den ganzen Fahrbereich mit großen Geschwindigkeitsunterschieden nicht möglich ist, ergeben sich nur im Stadtverkehr Verbrauchseinsparungen. Bei Überlandverkehr resultieren keine Einsparungen und bei Autobahnverkehr ein höherer Verbrauch.⁴⁴

Two-Mode-Concept, (zwei stufenlos einstellbare Betriebsbereiche)

Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe E-CVT bestehen in der Regel aus zwei elektrischen Maschinen (Variator) und einem einfachen Planetenradgetriebe (Radsatz), siehe Abb. 5.13.

Durch erweitern (koppeln) des einzelnen Planetenradsatzes mit einem zweiten Planetenradsatz kann erreicht werden, dass beide elektrischen Maschinen die Drehzahl Null durchlaufen, um den Wert ε_{EL} über größere Geschwindigkeitsbereiche bzw. Übersetzungsbereiche unter 0,3 zu halten und auf diese Weise einen guten Getriebewirkungsgrad sicherzustellen. Im Anfahrbereich ist dies nicht möglich, da die notwendige Getriebeübersetzung nur durch einen zu hohen Zuwachs an elektrischer Leistung erreicht werden könnte.

Um die Verbrauchsreduzierung eines Hybridantriebs nicht durch einen schlechten Wirkungsgrad des Getriebes mit großen Elektromaschinen relativieren zu müssen, ist es notwendig den Übersetzungsbereich des Getriebes zu erweitern. Die Erweiterung erfolgt über

⁴³ Vgl. Hofmann 2010, S. 32

⁴⁴ Vgl. Hohenberg&Indra 2006 zitiert nach Kirchner 2007, S. 575

die Drehzahlverstellung der Variatorein- und Ausgangswelle mittels Schaltelementen und eines dritten Planetenradsatzes, auch Dual Mode Getriebe genannt.

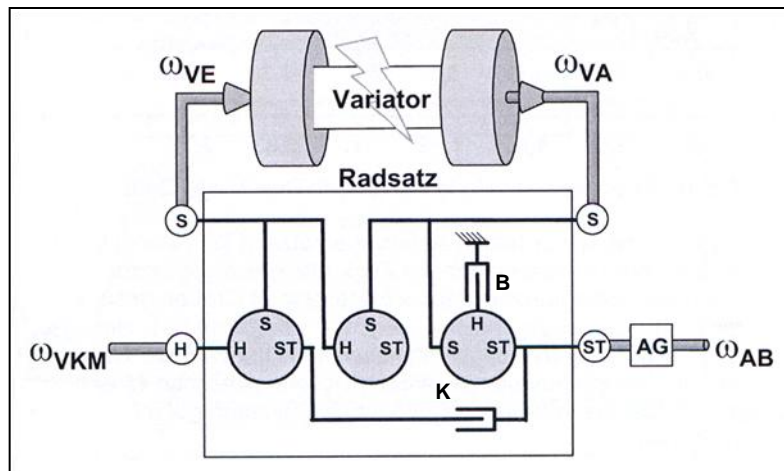


Abb. 5.17 - Dual-Mode-Getriebe mit drei Planetensätzen und zwei Schaltelementen K und B.⁴⁵

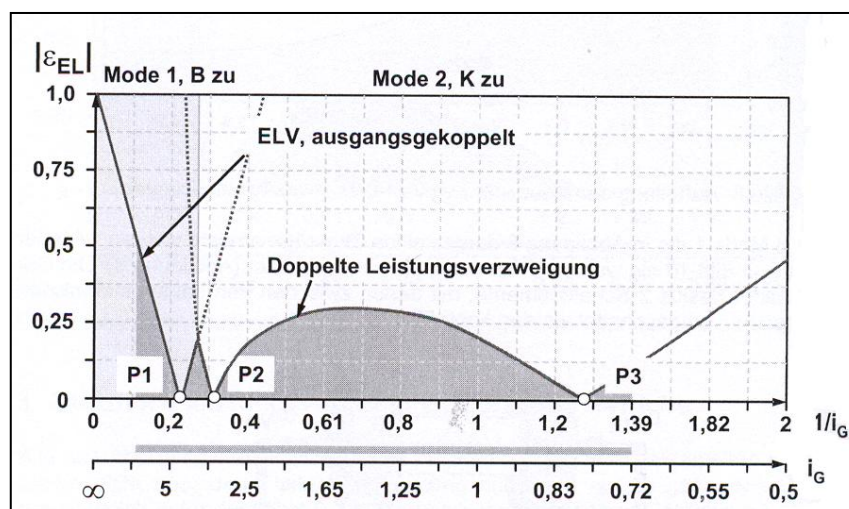


Abb. 5.18 - Leistungsaufteilung beim Dual-Mode-Getriebe mit drei Planetensätzen.⁴⁶

Mode 2, (K geschlossen, doppelte Leistungsverteilung)

In den Punkten P2 und P3 hat jeweils eine der elektrischen Maschinen die Drehzahl Null, daher nimmt die Leistung P_{EL} ein Minimum an. Zwischen den Punkten ist die Variatorleistung P_{EL} klein. Außerhalb steigt sie ins Unendliche. Mode 2 wird auch als compound split mode bezeichnet.

Mode 1, (B zu, einfache Leistungsverzweigung ELV)

Der Mode 1 bringt neben den Punkten P2 und P3 einen weiteren Punkt P1 mit sich, an dem eine elektrische Maschine steht. Dadurch kann der Getriebewirkungsgrad weiter gesteigert werden. Mode 1 wird auch als input split mode bezeichnet.

⁴⁵ Vgl. Schäfer 2007, S. 119

⁴⁶ Vgl. Schäfer 2007, S. 120

Die Aufteilung in 2 stufenlose Fahrbereiche wird so gewählt, dass mit dem ersten stufenlosen Fahrbereich (Mode 1), aufgrund der hohen Getriebeübersetzung, der Anfahrbereich und mit dem zweiten stufenlosen Fahrbereich (Mode 2), die niedrigen Getriebeübersetzungen für höhere Geschwindigkeiten abgedeckt werden.

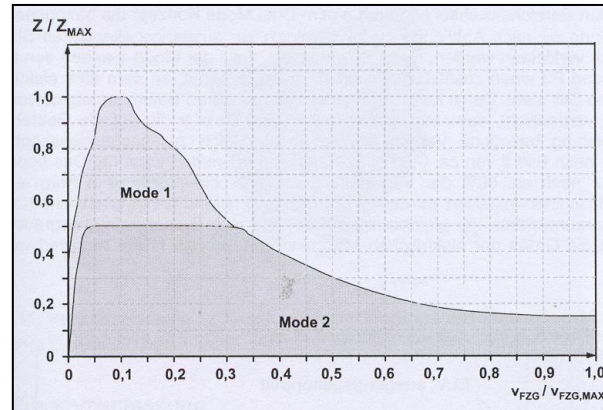


Abb. 5.19 - Modeaufteilung im Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm.⁴⁷

Ein bereits in Serie befindliches Dual-Mode-Getriebesystem ist das von General Motors, Daimler Chrysler und BMW entwickelte Two-Mode-Hybridantriebsystem⁴⁸. Es ermöglicht neben zwei variablen leistungsverzweigten Betriebsmodi auch rein mechanische Übersetzungen mit 4 Getriebestufen mit festen Übersetzungsverhältnissen.

Die vier Gänge mit festem Übersetzungsverhältnis überlagern die zwei EVT-Betriebsarten. (EVT = electrically variable transmission). Es stehen insgesamt sechs Betriebsarten zur Verfügung.

Im Stadtverkehr und Stop-and-go-Betrieb kann das Fahrzeug entweder nur mit zwei Elektromotoren, nur mit dem Verbrennungsmotor oder mit beiden Antrieben gleichzeitig bewegt werden.⁴⁹

Das Vollhybridsystem ist aus mechanischer Sicht und in Bezug auf die Gesamtgröße mit einem herkömmlichen Wandler-Stufen-Automatikgetriebe vergleichbar, kann aber mit stufenloser- oder gestufter Übersetzung in einem der vier Gänge mit festen Übersetzungsverhältnis betrieben werden. Das gesamte Hybridsystem wird kontinuierlich von einem elektronischen Steuergerät koordiniert, um für jede Laststufe des Motors den effizientesten Betriebspunkt auszuwählen. Es eignet sich besonders für Anwendungen, die größere Verbrennungsmotoren erfordern, wie beispielsweise bei Anhängerbetrieb oder schwerer Beladung.

⁴⁷ Vgl. Schäfer 2007, S. 119

⁴⁸ Vgl. Kirchner 2007, S. 581 f

⁴⁹ Vgl. Hofmann 2010, S. 22 f

Das System wird bereits in der Serienproduktion eingesetzt. Z.B. BMW X6 Hybrid und Mercedes ML450 Hybrid.

Vorteile des Two-Mode-System

- Das Two-Mode-System ist eine Weiterentwicklung des einfachen Single-Mode-Systems (Toyota-Prius) und optimiert dessen Schwachstellen wie hoher Kraftstoffverbrauch bei Überland- und Autobahnfahrt.
- Geringerer kombinierter Kraftstoffverbrauch im Stadt- und Überlandverkehr.
- Bessere dynamische Eigenschaften und Zugvermögen beim Überholen und bei starken Steigungen.
- Die sechs Betriebsbereiche reduzieren die Leistungsübertragung durch den weniger effizienten elektrischen Zweig, so ist es möglich, Elektromotoren einzusetzen, die nicht nur kompakter, sondern auch unabhängiger von der Leistungs- und Drehmomentcharakteristik des Verbrennungsmotors sind.
- Vorhandene Verbrennungsmotoren können mit geringfügigen Änderungen weiterhin genutzt werden, da durch das Vollhybridsystem keine nennenswerten Einschränkungen in Bezug auf die Größe oder Art des Verbrennungsmotors bestehen (kompakte Bauweise).

5.1.4 Kombinierte Hybridantriebe

Er ist eine Mischform aus parallelen und seriellen Hybrid. Er stellt einen Sonderfall dar. Durch die zwei Elektromotoren und eine Kupplung besteht die Möglichkeit einer seriellen und parallelen Betriebsweise.

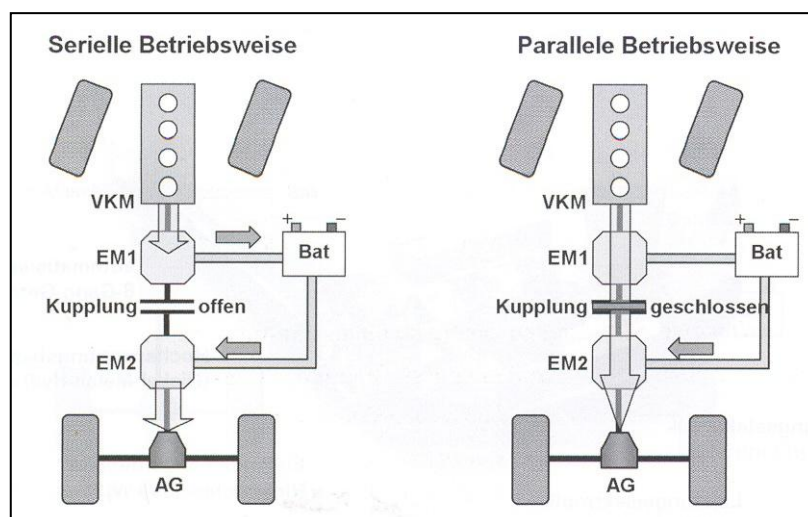


Abb.5.20 - Kombiniertes Hybridantriebsstrang in serieller und paralleler Betriebsweise.⁵⁰

⁵⁰ Vgl. Hofmann 2010, S. 24

Beim kombinierten Hybrid besteht die Möglichkeit, durch schließen einer Kupplung direkt die Leistung des Verbrennungsmotors mechanisch an die Räder zu übertragen.

Dies ermöglicht in bestimmten Betriebszuständen eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades (z.B. bei Autobahnfahrt).

Die beiden E-Motoren können gleichzeitig, wie bei einem parallelen Hybrid noch zusätzlich Leistung abgeben und so kurzzeitig die Spitzenleistung im Boostbetrieb erhöhen.

Dem verbesserten Wirkungsgrad steht der höhere Aufwand durch die Kupplung und die komplexere Betriebsstrategie gegenüber (z.B.: VW twin Drive).

Die Anordnung von Verbrennungsmotor und Generator kann nicht mehr frei gewählt werden, da eine direkte Ankoppelung an den Antriebsstrang erfolgen muss.

5.2 Einteilung Hybridantriebe nach dem Hybridisierungsgrad (H)

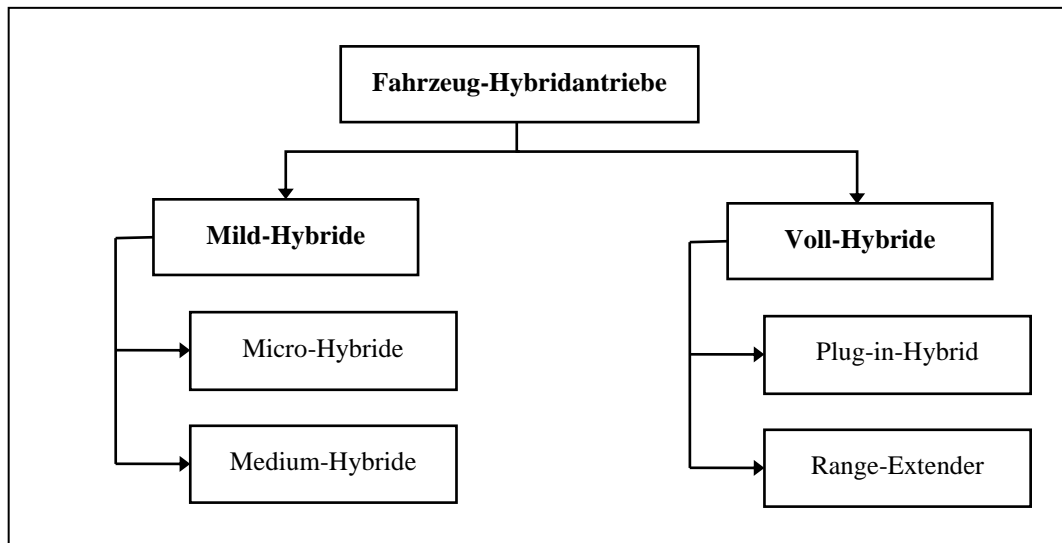


Abb. 5.21 – Hybridfahrzeuge, Einteilung nach dem Hybridisierungsgrad.⁵¹

Es wird zwischen den zwei Hauptvarianten Mild Hybrid und Full Hybrid unterschieden. Unterscheidungsmerkmal ist der Hybridisierungsgrad (H).

Der Hybridisierungsgrad gibt an, in welchem Maße die Aufteilung der Antriebsleistung zwischen Verbrennungsmotor und Elektromotor variiert werden kann.⁵²

Der Hybridisierungsgrad kann als Verhältnis zwischen der elektrischen Leistung zur Gesamtleistung angegeben werden.⁵³ Er beträgt bei Mildhybridfahrzeugen ca. 0,15 und bei Vollhybridfahrzeugen ca. 0,30.

$$H = \frac{P_{EL}}{P_{Ges}} \quad (15)$$

HHybridisierungsgrad (–)

P_{EL}Elektrische Leistung (kW)

P_{Ges} ...Gesamtleistung aus Elektroantriebsleistung und Verbrennungsmotorleistung (kW)

⁵¹Vgl. Kanzian 2010, Eigendiagramm

⁵²Vgl. Bosch (3) 2008, S. 8

⁵³Vgl. Isermann 2010, S. 29

Je nach Grad der Hybridisierung werden wird zwischen Mild-Hybrid und Full-Hybrid unterschieden. Die beiden Hybridantriebe unterscheiden sich wesentlich in der Leistung der E-Maschine bzw. bezüglich des Anteils, den der Elektroantrieb zur gesamten Antriebsleistung beiträgt. Die Energieinhalte der elektrischen Energiespeicher sind ebenfalls merklich unterschiedlich.

5.2.1 Mild-Hybrid

Der Mild-Hybrid wird als Parallelhybrid gebaut, siehe Abschnitt 5.1.2. Der Verbrennungsmotor und der Elektromotor sind auf der gleichen Welle angebracht. Der Elektromotor liefert ein zusätzliches Drehmoment, das sich zum Drehmoment des Verbrennungsmotors addiert. Das Fahrzeug hat ein konventionelles 12V-Bordnetz zur Versorgung der Standardverbraucher und ein Traktionsbordnetz mit höherer Spannung. Die elektrische Leistung wird vom Energiespeicher zur Verfügung gestellt und beträgt ca. 15-20 kW. Die elektrische Leistung wird vor allem zum Anfahren und Beschleunigen bei niedrigen Motordrehzahlen eingesetzt.

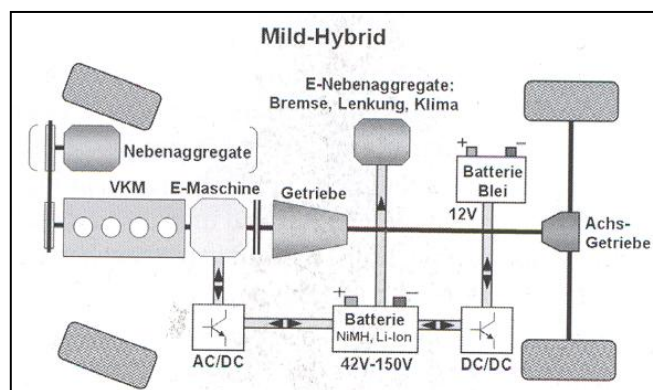


Abb. 5.22 – Mild-Hybrid-Komponenten.⁵⁴

Betriebsarten (Betriebsmodi)

- Rein elektrisches fahren ist nicht oder nur über kürzeste Strecken bedingt möglich. Dies ist energetisch nicht sinnvoll, da der Motor je nach Konzept mitgeschleppt werden muss (Kupplung, Freilauf, Zylinderabschaltung).
- Rein verbrennungsmotorisch fahren
- Hybridbetrieb (beide Systeme aktiv)
- Elektrische Unterstützung des Verbrennungsmotors beim Anfahren und Beschleunigen (Boosten).
- Start/Stopp Funktion
- Regeneratives Bremsen

⁵⁴ Vgl. Hofmann 2010, S. 45

Der Kraftstoffverbrauch kann im neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bis zu ca. 15 % geringer sein als bei konventionellen Antriebssystemen.⁵⁵

Beispiele für Mild-Hybrid-Fahrzeuge die bereits in Serie gebaut werden:

Honda Insight, Honda Civic, Mercedes S 400 H.

5.2.2 Der Micro-Hybrid

Micro-Hybrid Fahrzeuge haben keinen oder nur einen minimal unterstützenden elektrischen Antriebsmodus. Es wird vielfach diskutiert, ob sie überhaupt Hybridfahrzeuge sind, wenn sie lediglich über eine Start-Stopp-Automatik mit oder ohne Rekuperation verfügen, und kein zweites den Verbrennungsmotor unterstützendes Antriebssystem.

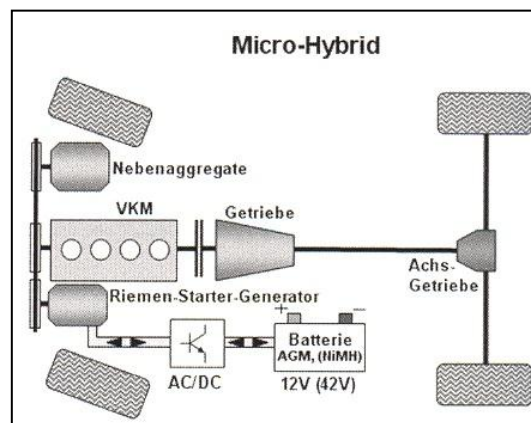


Abb. 5.23 – Micro-Hybrid-Komponenten.⁵⁶

Bei Micro-Hybriden wird für den Start-Stopp-Betrieb ein verstärkter Anlasser oder ein Riemen-Starter-Generator eingesetzt. Die Generatoren werden speziell geregelt.

Sie erzeugen nur Energie beim Bremsen und im Schubetrieb und oberhalb eines festgelegten Ladezustandes der Batterie. Beim Anfahren und Beschleunigen wird der Generator nicht erregt. Somit wird in diesen Phasen keine Energie bzw. Kraftstoff benötigt, um Energie zu erzeugen.

Betriebsarten (Betriebsmodi)

- Start/Stopp Funktion
- Regeneratives Bremsen

In der Literatur finden sich weitere, vom Hybridisierungsgrad abhängige Unterteilungen, des Mild-Hybrid in Medium-Hybrid.⁵⁷

⁵⁵ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 8

⁵⁶ Vgl. Hofmann 2010, S. 44

⁵⁷ Vgl. Isermann 2010, S. 29 f

5.2.3 Voll-Hybrid

Mit einem Voll-Hybrid-Pkw kann im Unterschied zum Mild Hybrid über längere Strecken allein mit dem elektrischen Antrieb gefahren werden. In Städten oder Ballungszentren kann somit abgasfrei gefahren werden.

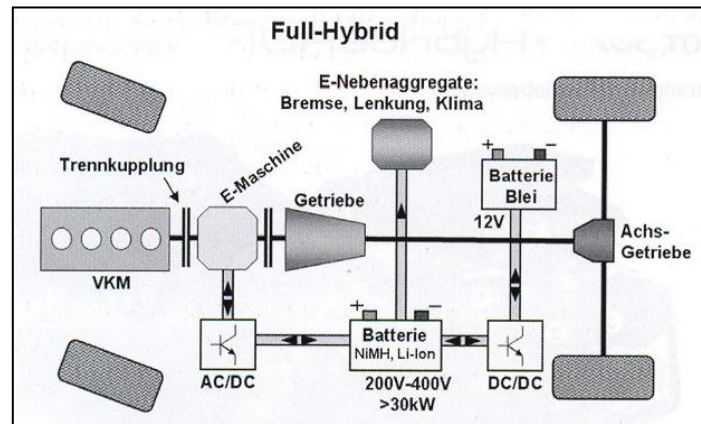


Abb. 5.24 – Full-Hybrid-Komponenten.⁵⁸

Ein Voll-Hybrid Pkw kann mit parallelem oder seriellen Energiefluss, oder aus einer Kombination von parallelem und seriellen Energiefluss (leistungsverzweigter Hybrid) ausgeführt sein.

Betriebsarten (Betriebsmodi)

- Rein elektrisches fahren ist möglich (ca. 1 bis 20 km)
- Rein verbrennungsmotorisch
- Hybridbetrieb (beide Systeme aktiv)
- Elektrische Unterstützung des Verbrennungsmotors beim Anfahren und Beschleunigen (Boosten).
- Start/Stop Funktion
- Regeneratives Bremsen

Plug-In-System bei parallelen- und leistungsverzweigten Voll-Hybriden

Bei diesem Fahrzeug kann das Batteriesystem an Ladestationen oder an der Haushaltssteckdose zusätzlich (extern) aufgeladen werden. Zu beachten ist, dass die begrenzte Leistungsabgabe der 230 V Haushaltssteckdose zu einer langen Ladedauer führen. Weiters gehen, je nach Batteriesystem, ca. 20-30 % der Ladeenergie verloren.⁵⁹ Die Traktionsbatterie kann größer ausgeführt werden als beim autarken Voll-Hybrid. Auf begrenzten Strecken wird das Fahrzeug quasi zum temporären „Elektroauto“.

Beispiel: Toyota Prius Plug-In: Flottenversuch läuft bereits, Serie ab 2012.

⁵⁸ Vgl. Hofmann 2010, S. 46

⁵⁹ Vgl. Bosch (1) 2003, S. 723

Plug-In-System bei seriellen Hybridantrieben.

Er hat eine serielle Antriebskonfiguration und wird Range Extender (Reichweiten-Erweiterer) genannt. Der Fahrzeugantrieb erfolgt permanent durch einen Elektromotor. (Siehe Kapitel 5.1.1.1)

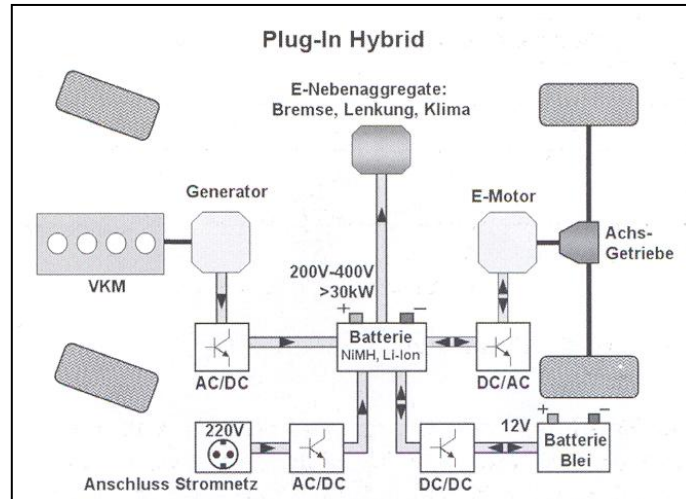


Abb. 5.25 – Serieller-Plug-In-Hybrid- Komponentenanzordnung (Range Extender).⁶⁰

Ab 2012 sollen die seriellen Plug-In-Hybride (Range Extender), Opel Ampera und Chevrolet Volt in Serie gehen. Nicht offiziellen Meldungen zufolge sollen sie trotz bisherigen Veröffentlichungen doch einen mechanischen Zweig zu den Antriebsrädern haben, um den Kraftstoffverbrauch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten gering zu halten, siehe hierzu Kapitel 5.1.1 (Nachteile).

	Leistung [kW]	Speicherkapazität [kWh]	Spannungen [V]	Hybridi- sierungsgrad	Masse [kg]	
					NiMH	Li- ion
Microhybrid	<5	0,8-1,5	12	<5%	11-38	5-21
Mildhybrid	<10	0,8-1,5	12/42	<10%	11-38	5-21
Mediumhybrid	10-30	1,0-2,0	12/144	<20%	14-50	6-28
Vollhybrid	30-100	1,5-3,0	12/200/500	<30%	21-75	30- 60
Plug in Hybrid	40-120	5-15	12/200/500	<30%	71- 380	30- 200
Elektrisch Vehicle	30-80	15-40	120		220- 500	100- 500

Tabelle 5.1 - Verschiedene Daten für Hybrid und Elektroantriebe von Personenkraftwagen.⁶¹

⁶⁰ Vgl. Hofmann 2010, S. 48

⁶¹ Vgl. Isermann 2010, S. 29

6. Hauptkomponenten des Hybridantriebes

6.1 Verbrennungskraftmaschinen

Unabhängig vom Hybridantrieb wird an der Wirkungsgradverbesserung des gesamten Antriebsstranges gearbeitet, vor allem an der Effizienzsteigerung des Otto- und Diesel-Verbrennungsmotors und den Nebenaggregaten.

Bei Pkw-Hybridfahrzeugen die derzeit in Serie gebaut werden oder kurz vor der Serieneinführung sind werden vor allem Ottomotoren seltener Dieselmotoren verwendet. Otto- und Dieselmotoren werden in der Regel für den Hybrideinsatz optimiert. Studien beschäftigen sich aber auch mit anderen Verbrennungsmotoren wie z.B. Diesottomotor, Wankelmotor, Zweitaktmotor, Gasturbine.

Aus technischer Sicht ist die Senkung des Kraftstoffverbrauchs der Hauptgrund für die Entwicklung von Hybridantriebskonzepten bei Personenkraftwagen. Auch die Senkung der Schadstoffe ist bei Hybridfahrzeugen wichtig, siehe auch Abschnitt 3.2. Im Folgenden Abschnitt werden einige wichtige Maßnahmen betrachtet, die bei Otto- und Dieselmotoren in Hybridfahrzeugen eingesetzt werden.

6.1.1 Lastpunktanhebung.

Der Nutzwirkungsgrad η_{eff} (effektiver Wirkungsgrad) von PKW-Verbrennungsmotoren beträgt bei Otto-Motoren 0,28-0,33 und bei Dieselmotoren 0,32-0,45⁶². Diese Optimalwerte werden nur bei einem bestimmten Betriebszustand (Lastpunkt) erreicht.

Bei niedrigen Lastanforderungen, wie z.B. sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten weisen Verbrennungsmotoren ungünstige Wirkungsgrade auf. Das bedeutet, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch b_e (g/kWh) im Teillastbetrieb höher ist als nahe dem Volllastbetrieb. Gründe sind Drosselverluste und anteilmäßig höhere Reibung und Schleppverluste im Teillastbetrieb.⁶³

Mit der sogenannten Lastpunktanhebung wird der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors von einem ungünstigen Kraftstoffverbrauchsbereich (Wirkungsgrad) in einen optimalen Verbrauchsbetriebspunkt mit weniger Verbrauch und besserem Wirkungsgrad verschoben.

Die Lastpunktanhebung kann auf zwei Arten umgesetzt werden:

- Lastpunktanhebung über die E-Maschine
- Lastpunktanhebung durch DownsPEEDING

⁶² Europa (1) 2008, S. 58

⁶³ Grohe 1990, S. 51

Die nachstehende Abbildung 6.1 zeigt das Verbrauchskennfeld eines Otto-Saugmotor-Einspritzers.

Es sind die Fahrwiderstandskennlinie für den 4. und 6. Gang eingezeichnet. Weiteres sind für 50 km/h, 100 km/h und 130 km/h Konstantfahrt ohne Steigung die Fahrleistungshyperbeln eingezeichnet.⁶⁴ Entlang dieser Hyperbeln ist die Fahrleistung konstant.

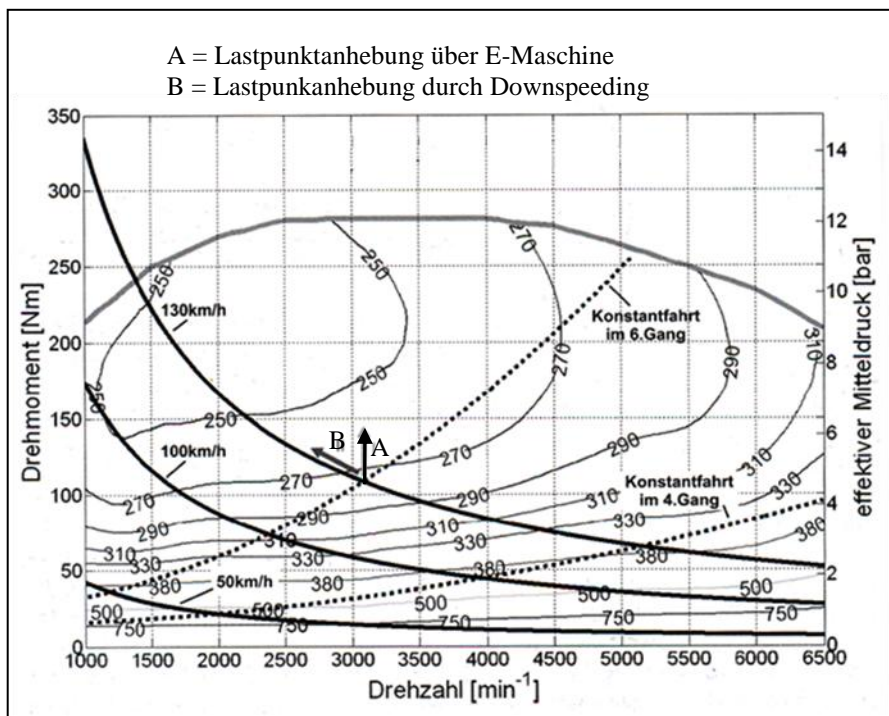


Abb. 6.1 Verbrauchskennfeld eines Otto-Saugmotor-Einspritzers.⁶⁴

Der niedrigste spezifische Kraftstoffverbrauch $b_e = 250 \text{ g/kWh}$ wird bei niedrigen Drehzahlen und hohen Lasten erreicht. Mit steigender Motordrehzahl und vor allem bei sinkender Last nehmen die Verbrauchswerte zu.

Personenfahrzeuge werden in der Praxis und bei der genormten Kraftstoffverbrauchsmessung nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) anteilmäßig sehr oft im unteren Drehzahl- und Lastbereich betrieben. Durch die Verschiebung des Verbrennungsmotor-Betriebspunktes in ein Kennfeld mit geringerem Kraftstoffverbrauch steigt der Wirkungsgrad und die Schadstoffe (CO_2) nehmen ab. Diesen Vorgang nennt man Lastpunktanhebung.

⁶⁴ Vgl. Hofmann 2010, S. 72

- **Lastpunktanhebung über die E-Maschine**

Bei den meisten Hybridantriebskonzepten kann bei genügend elektrischer Leistung die vom Fahrer gewünschte Leistungsanforderung an den Antriebsstrang, von der Leistungsanforderung an den Verbrennungsmotor getrennt werden.

Durch diese Trennung kann der Verbrennungsmotor auch bei wenig Antriebsleistungsbedarf in einem verbrauchsgünstigen Kennfeldbereich mit gutem Wirkungsgrad betrieben werden. Die überschüssige Motorleistung wird über den Generator in elektrische Energie umgewandelt und in der Traktionsbatterie gespeichert. Diese Energie steht bei Bedarf für das rein elektrische Fahren oder zur Unterstützung beim Anfahren und Beschleunigen Boosten wieder zur Verfügung. Wichtig ist, dass die Verbrauchseinsparungen durch die Lastpunktanhebung größer sind als die elektrischen Verluste im Generator, Umrichter, Batterie und Antriebselektromotor von ca. 30 %.⁶⁵

Der Dieselmotor hat bessere Teilwirkungsgrade als der Ottomotor. Diese Methode der Wirkungsgradverbesserung ist nur bei niedrigen Lasten und bei Ottomotoren effizient.

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die betriebspunktentkoppelte Betriebsweise des Verbrennungsmotors durch das ungewohnte Geräuschniveau vom Fahrer als störend empfunden werden kann.

- **Lastpunktanhebung durch Downsizing**

Durch eine längere Übersetzung des Antriebsstranges wird bei gleicher Leistungsanforderung die Drehzahl des Motors abgesenkt, und das Drehmoment angehoben. Der Motorbetriebspunkt wird dadurch in einen Bereich mit geringerem Kraftstoffverbrauch verschoben.

Die Lastpunktanhebung durch Downsizing ist gut geeignet bei Fahrzeugen mit stufenlosen Automatikgetrieben (E-CTV, Toyota Prius). Hier kann der Motorbetriebspunkt nahezu frei entlang der Leistungshyperbel gewählt werden. Weiters ergeben sich Vorteile bei kleinen Motoren mit Turboaufladung (Downsizing, Turboloch) durch rascheren Abgasdruckaufbau.

Nachteil dieser Methode ist, dass das Durchzugsvermögen des Fahrzeuges (Elastizität) abnimmt, weil die Drehmomentreserve vom Motorbetriebspunkt bis zum Volllastbetriebspunkt abnimmt.

Durch den Einsatz eines Elektromotors kann der Elastizitätsverlust nicht nur ausgeglichen, sondern das Beschleunigungsvermögen erhöht werden. Bei geringer Beschleunigung wird der elektrische Zweig nicht eingesetzt. Der Antrieb erfolgt über das Getriebe rein mechanisch mit gutem Wirkungsgrad.

⁶⁵ Vgl. Schäfer 2007, S. 6

6.1.2 Atkinson-Prozess bei Otto-Verbrennungsmotoren

Motoren die nach dem Atkinson arbeiten, haben in der Regel ein hohes geometrisches Verdichtungsverhältnis von $\epsilon > 11,5$. Beim Atkinson-Prozess verlaufen Verdichtung und Expansion nicht symmetrisch. Die Expansionsphase ist länger als die Verdichtungsphase. Die Einlassventile werden durch die variable Ventilsteuerung sehr spät geschlossen. Während der Kompression wird dadurch ein Teil der Ladung wieder ausgeschoben und das effektive Verdichtungsverhältnis reduziert. Es ist zwischen 9,5 und 5 einstellbar (variabel).

Durch das hohe Verdichtungs- bzw. Expansionsverhältnis wird ein hoher thermischer Wirkungsgrad erreicht, dies bringt Verbrauchsvorteile im vielgefahrenen Teillastbereich. Durch das niedrige effektive Verdichtungsverhältnis wird die Klopfneigung bei hohen Lasten gering gehalten, die Motorleistung ist geringer.

Das spätere Schließen der Einlassventile kann auch beim Motorstart eingesetzt werden. Ziel ist ein komfortabler und vibrationsarmer Startvorgang.

Bei konventionell angetriebenen Personenzfahrzeugen mit Ottomotor kommt dieses Verfahren nicht zum Einsatz, weil Atkinson-Motoren neben den Verbrauchs- und Emissionsvorteilen tendenziell ein geringeres Drehmoment im unteren Drehzahlbereich und damit ein schlechteres Ansprechverhalten besonders im unteren Drehzahlbereich bieten.⁶⁶ Bei Hybridfahrzeugen wird dieser Nachteil durch den Einsatz der Elektromotoren beim normalen Anfahren, Beschleunigen oder Boosten kompensiert.

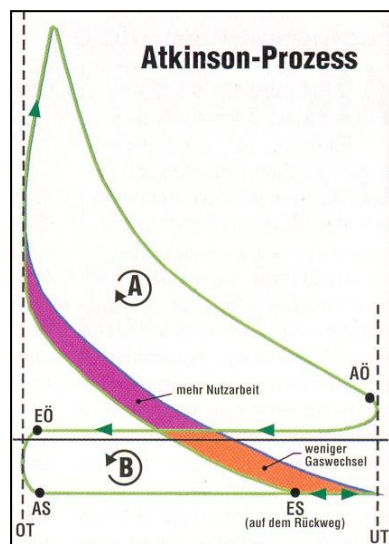


Abb. 6.2 – Atkinson-Prozess⁶⁷

(Zylinderdruck in Abhängigkeit vom Hubvolumen)

- EÖ....Einlassventile öffnen
- ES....Einlassventile schließt
- AÖ....Auslassventile öffnet
- AS....Auslassventile schließt
- A.....Arbeitsgewinn
- B.....Arbeitsverlust

Fahrzeugmotoren mit Atkinson Prozess: Toyota Prius Hybrid, Mercedes S400 Hybrid.

⁶⁶ Bosch (3) 2008, S. 24

⁶⁷ Technik Profi (1) 2009, S. 14

6.1.3 Downsizing

Bei der Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors zum senken des Verbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Reduzierung spielt Downsizing eine wichtige Rolle. Beim Downsizing wird die Motorzylinderzahl klein gehalten aber die hubraumbezogene Motorleistung z. B. mit Turboaufladung erhöht.

Bei einem Hybridfahrzeug ist es beim Downsizing auch möglich, eine geringere Motorleistung zu akzeptieren, da diese mit Hilfe des Elektroantriebs ausgeglichen werden kann. Die Gesamtleistung steht aber nur für eine begrenzte Zeit zur Verfügung, da die Batterieladung abnimmt.

$$P_H = \frac{P_{eff}}{V_H} \quad (16)$$

P_HHubraumleistung (kW/l)

P_{eff}Größte Nutzleistung (kW)

V_HGesamthubraum in Liter (l)

Motoren mit kleinerem Hubraum und wenigen Zylindern werden häufiger mit einem höheren, im Wirkungsrad günstigeren Drehzahlbereich betrieben als mehrzylindrige, hubraumstarke Antriebsaggregate.

6.1.4 Reibungsoptimierung

Beim Hybridantrieb wird ein Teil der elektrischen Antriebsenergie durch regeneratives Bremsen (Rekuperation) gewonnen. Dies kann sowohl beim aktiven Bremsen als auch beim Schubbetrieb erfolgen. Je nach Antriebskonzept kann der Verbrennungsmotor dabei nicht abgekoppelt oder abgestellt werden. Er muss mitschleppt werden. Seine Schleppleistung schränkt die Rekuperation ein. Reibungsoptimierung ist daher sehr wichtig.

Die Motorreibung wird hauptsächlich durch nachstehende Maßnahmen verringert:

- Leichtlauföl
- Kolbenringvorspannung ⁶⁸
- Ventiltrieboptimierung.

Bei schwacher Auslegung ist eine Motordrehzahlbegrenzung notwendig.

⁶⁸ Basshusen/Schäfer 2007, S. 350 ff

7. Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge

7.1 Eigenschaften und Anforderungen

Im Antriebsstrang eines Hybridfahrzeuges wandelt die Elektromaschine die elektrische Energie in mechanische Energie um. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren können Elektromaschinen auch generatorisch betrieben werden. Sie sind elektromechanische Energiewandler die in beide Richtungen betrieben werden können.⁶⁹

Die Energieversorgung der Elektroantriebe kann aus Gleichstromquellen wie Traktionsbatterien, Generator und Traktionsbatterie, kurzzeitig aus Kondensatoren oder aus einer Brennstoffzelle erfolgen. Für den Betrieb der Elektromaschinen sind effiziente Leistungselektronikeinheiten mit Regelungen erforderlich.⁷⁰

Wichtige Anforderungen für Elektromaschinen in Hybridfahrzeugen sind:

- **Bester Wirkungsgrad**
Der Wirkungsgrad hat direkten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch des Hybridfahrzeugs und dessen CO₂ Ausstoß.
- **Große Drehmomentfähigkeit**
Sie müssen über einen weiten Drehzahlbereich ausreichend Leistung zur Verfügung stellen. Der Elektroantrieb muss auch genug Drehmomentreserve für elektrisches Fahren und gleichzeitiges Starten des Verbrennungsmotors haben.
- **Kompakte Baugröße**
Das Drehmoment von Elektromotoren ist abhängig von der Baugröße. Für eine höhere Leistung muss die Drehzahl gesteigert werden.⁷¹ Die Baugröße ist in Kraftfahrzeugen sehr wichtig.
- **Betriebsarten**
Elektroantriebe von Hybridfahrzeugen müssen abhängig von der Antriebskonfiguration und dem Hybridisierungsgrad (siehe Kapitel 5) nachstehend betrieben werden können:
 - Im Motorbetrieb (Antrieb, Beschleunigen) bei unterschiedlichen Drehzahlen.
 - Drehrichtungsumkehr (Rückwärtsfahren)
 - Generatorbetrieb (Bremsen, Schubbetrieb)
 - Starten des Verbrennungsmotors
 - Elektroantrieb (Fahren) und gleichzeitig den Verbrennungsmotor starten.

⁶⁹ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 31

⁷⁰ Vgl. Hofmann 2010, S. 113 ff

⁷¹ Vgl. Lämmerhirt 1989, S. 19

- Wichtige Eigenschaften

Mechanische Festigkeit, Geräuscharmheit, gute Wärmeabfuhr, geringes Gewicht.⁷²

Die Elektromaschine besteht aus einem feststehenden und einem rotierenden Teil. Den feststehenden Teil nennt man Ständer oder Stator. Den rotierenden Teil nennt man Rotor oder Läufer. Im Stator wird die elektrische Leistung zugeführt. Im sich drehenden Läufer wird mechanische Leistung abgeführt oder zugeführt. Die elektrische Energiewandlung findet im Luftspalt zwischen Stator und Rotor statt. Verluste entstehen sowohl im Ständer als auch im Läufer.

Die Betriebseigenschaften der Elektromaschinen sind gut für den Kfz-Antrieb geeignet. Ein besonderes Merkmal von Elektromaschinen ist, dass sie zwei unterschiedliche Betriebsgrenzen haben, innerhalb derer sie betrieben werden können.

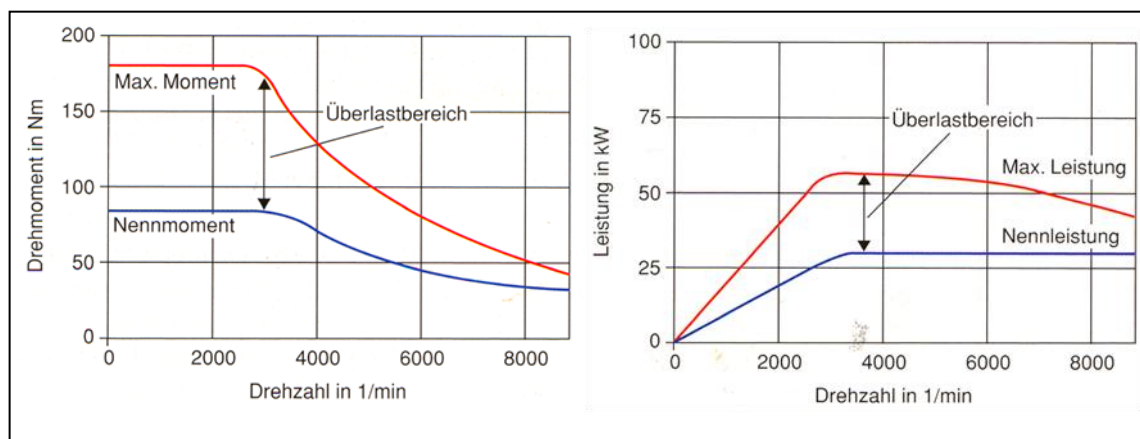


Abb.7.1 - Drehmoment und Leistungskurve einer Asynchron Maschine.⁷²

Nennlastbereich

Die Nenngrößen wie das Nenndrehmoment M_N und die Nennleistung P_N können dauerhaft eingestellt werden, ohne dass die Maschine thermisch oder mechanisch überlastet wird.

Überlastbereich

In diesem Bereich kann die Maschine für kurze Zeit mit wesentlich höheren Werten betrieben werden. Im Überlastbereich dürfen die Maximalgrößen wie das maximale Drehmoment M_{\max} und die maximale Leistung P_{\max} nur für kurze Zeit eingestellt werden. Bei zu langem Betrieb der Elektromaschine im Überlastbereich kommt es durch zu große Ströme zu einer thermischen Überlastung der Maschine. Kriterium ist die Isolierklasse der Wicklungsisolierung.⁷³

Die Überwachung der max. zulässigen Wicklungstemperatur im Ständer kann direkt durch einen Sensor und die des Rotors indirekt durch eine Softwarelösung erfolgen.⁷⁴

⁷² Vgl. Gerl, 2002, S. 42 f

⁷³ Vgl. Hofmann, 2010, S. 114 f

⁷⁴ Vgl. Bosch 2008, S. 34

Die Überlastfähigkeit von elektrischen Maschinen kann bei Hybridfahrzeugen für die Abdeckung von Leistungsspitzen z.B. beim Beschleunigen oder zur Überbrückung der Anfahrschwäche durch das sogenannte „Turboloch“ bei aufgeladenen Motoren genutzt werden. Elektromaschinen sind je nach Auslegung kurzfristig bis ca. zum zweifachen ihrer Nennbelastung belastbar.

7.1.2 Charakteristik

Verbrennungsmotoren und Elektromotoren haben grundsätzlich unterschiedliche Kennlinien. Während beim Verbrennungsmotor erst im Bereich der Lehlaufrdrehzahl ein Drehmoment abgegeben werden kann, reicht der Betriebsbereich der Elektromaschine bis zum Stillstand (Drehzahl Null). Sie kann auch im Stillstand das maximale Moment abgeben. Dadurch kann in einem Antriebsstrang die Anfahrkupplung entfallen.

Abhängig von der Auslegung und Steuerung kann Sie mit positiven und negativen Momenten, d.h. motorisch und generatorisch sowie in beide Drehrichtungen (Vierquadranten-Bereich) arbeiten.

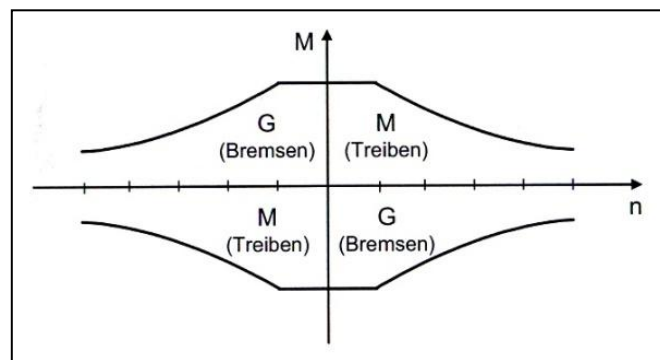


Abb. 7.2 – Vierquadrantenbetrieb eines elektrischen Antriebs.⁷⁵

M (Treiben)....Vorwärts antreiben und Rückwärts antreiben.

G (Bremsen)....Vorwärts und Rückwärts bremsen.

Die Drehmomentcharakteristik der Elektromaschine entspricht sehr gut den Drehmomentanforderungen an den Antriebsrädern von Fahrzeugen. Die Nachstehende Abbildung zeigt die maximale Zugkraft eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und 5-Gang-Schaltgetriebe im Vergleich zur Charakteristik einer Elektromaschine.

⁷⁵ Vgl. Schäfer 2007, S. 3

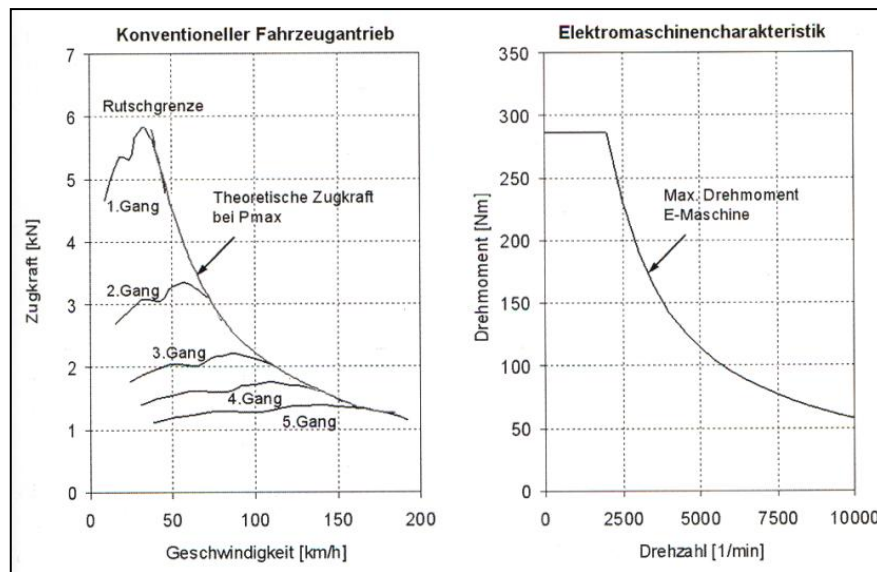


Abb. 7.3 – Vergleich max. Zugkraft an den Antriebsrädern zum E-Maschinendrehmoment.⁷⁶

Bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor muss durch das Wechselgetriebe die Zugkraft an den Rädern in Abhängigkeit von der geforderten Leistung und der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs eingestellt werden. Bei einer Elektromaschine entspricht die Drehmomentcharakteristik nahezu ideal den Anforderungen.

Aufgrund dieser Charakteristik kann bei einem elektrischen Antrieb in der Regel auf ein Schaltgetriebe verzichtet werden. Zusätzliche Drehzahlanspassungen können durch ein- oder zweistufige Getriebestufen realisiert werden.⁷⁷

Bsp: Toyota Lexus GS450h, Lexus LS600h

⁷⁶ Vgl. Hofmann 2010, S. 117

⁷⁷ Vgl. Hofmann 2010, S. 266 f

7.2 Elektromaschinentypen

Aufgrund der Fortschritte der Leistungselektronik (Stromrichtertechnik) werden heute in Serien-Personenwagenhybridfahrzeugen Drehstromantriebe eingesetzt.

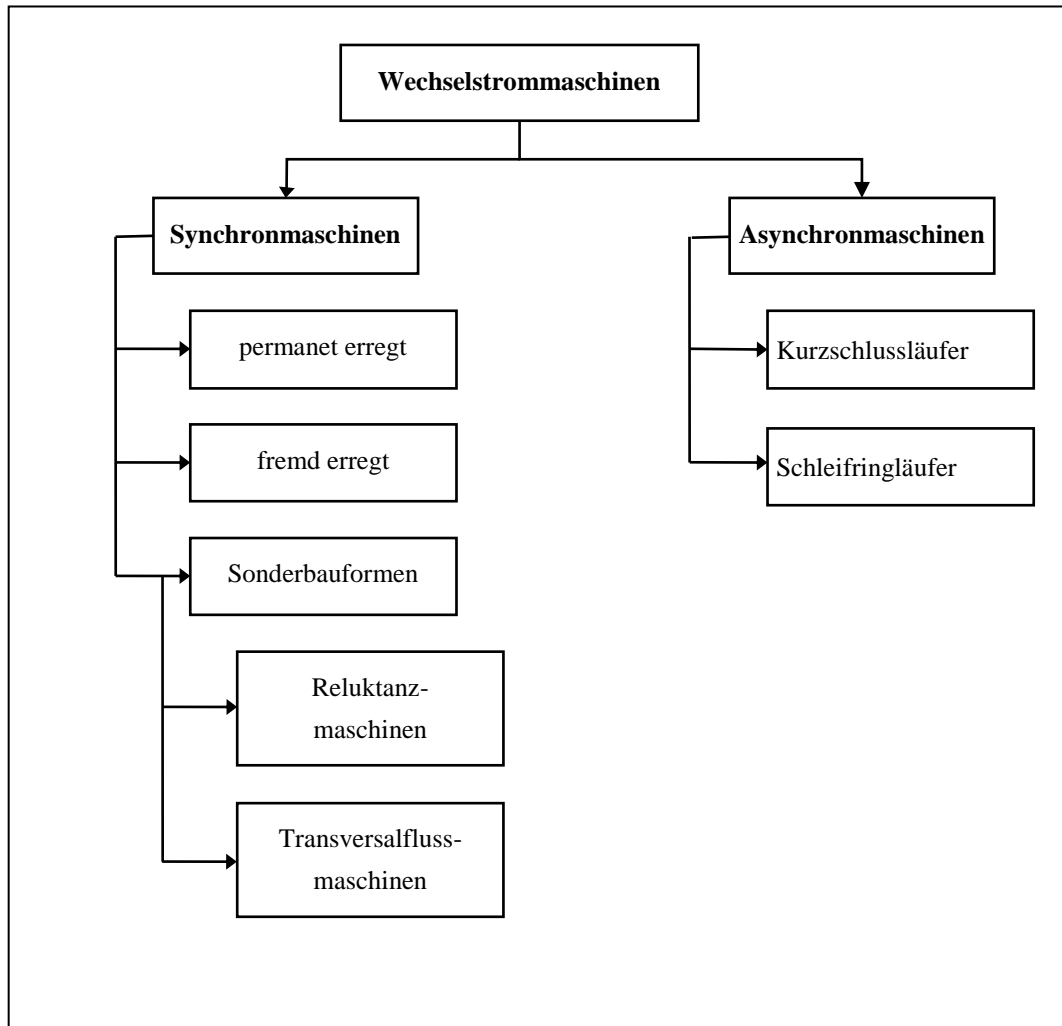


Abb. 7.4 – Übersicht Wechselstrommaschinen.⁷⁸

7.2.1 Drehstrommaschinen

Drehstrommaschinen sind Wechselstrommaschinen, wobei der Aufbau und die Wirkungsweise auf einem elektrischen Drehfeld basieren, dass durch einen dreiphasigen Wechselstrom erzeugt wird.

Die Drehfeldwicklungen befinden sich am Ständer des Motors. Synchrone und asynchrone Drehfeldmaschinen haben im Ständer prinzipiell den gleichen Aufbau, der in beiden Fällen aus einem Blechpaket mit Drehstromwicklung besteht. Die Drehstromwicklung besteht aus drei um 120° versetzten Spulen. Die drei Wechselspannungen des Drehstromnetzes sind zeitlich um 120° phasenverschoben und speisen die drei Wicklungen mit den nachfolgenden Strömen.

Dadurch entsteht ein magnetisches Drehfeld, welchem der Rotor folgt.

⁷⁸ Vgl. Hofmann 2010, S. 114

Das Drehfeld läuft mit der Frequenz f_1 um, wodurch sich die mechanische, synchrone Drehzahl n_s nach Gleichung (17) einstellt.

$$n_1 = n_s = \frac{f_1}{p} \quad (17)$$

$n_1 = n_s$...Synchrone Drehzahl bei Frequenz f_1 (s^{-1})

f_1Frequenz des Wechselstromes(s^{-1})

pPolpaarzahl

Unterschiede ergeben sich lediglich im Läufer.

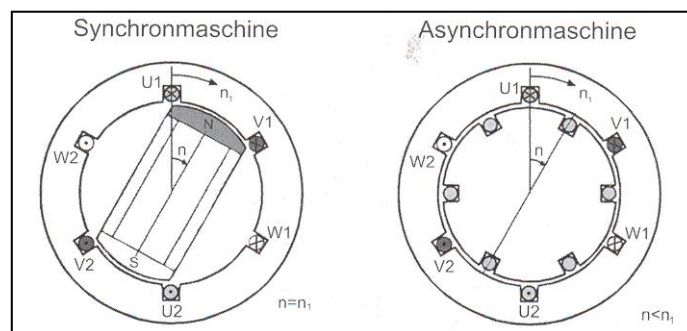


Abb. 7.5 – Läuferunterschiede.⁷⁹

Die Synchronmaschine hat im Läufer eine elektrische oder permanentmagnetische Erregung und folgt dem Ständerdrehfeld synchron, wogegen die Asynchronmaschine im Läufer eine Kurzschlusswicklung trägt. Solange die Läuferdrehzahl von der Synchrodrehzahl abweicht, induziert das Ständerdrehfeld in den Läuferwicklungen Ströme, wodurch ein Drehmoment entsteht. Die Abweichung der Läuferdrehzahl von der Synchrodrehzahl kennzeichnet man durch den sogenannten Schlupf.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (18)$$

sSchlupf

n_1Synchrone Drehzahl bei Frequenz f_1 (s^{-1})

f_1Frequenz des Wechselstromes (s^{-1})

nLäuferdrehzahl (s^{-1})

⁷⁹ Vgl. Hofmann 2010, S. 120

7.2.2 Asynchronmaschinen

Für Antriebe mit Asynchronmaschine wird die Frequenz des Statorfeldes verändert. Um ein konstantes Kippmoment zu behalten, muss neben der Frequenz auch das Verhältnis aus Statorspannung und Frequenz konstant gehalten werden.

Die veränderliche Frequenz und Spannung für das Statorfeld werden mit dem Stromrichter generiert. Um ein konstantes Kippmoment zu behalten, muss neben der Frequenz auch das Verhältnis aus Klemmenspannung und Frequenz konstant gehalten werden. Die veränderliche Frequenz und Spannung für das Statorfeld werden mit dem Stromrichter generiert.⁸⁰

7.2.3 Synchronmaschinen

Der Statoraufbau der Synchronmaschinen ähnelt dem der Asynchronmaschine. Der Rotor kann entweder mit Dauermagneten (permanentenerregte Synchronmaschine) bestückt sein oder die Magnetisierung erfolgt über gleichstromerregte Polräder (fremderregte Synchronmaschine). In diesem Fall weist der Rotor mit Wicklungen verschiedene Schenkelpole auf. Die Speisung der Erregerwicklung im Rotor erfolgt über Schleifringe durch einen Gleichspannungswandler (DC/DC - Konverter). Das Polrad kann aus massivem Stahl bestehen, da der magnetische Fluss zeitlich konstant ist.

Die Maschine kommt zwar ohne Magnetmaterial aus, die zusätzliche Leistungselektronik für den Erregerstrom sowie dessen Übertragung auf den Rotor sind Gegenstand von Vorentwicklungsaktivitäten, um diesen Maschinentyp für den Einsatz im Bereich der elektrischen Traktion robust zu machen.

Prinzipiell zeichnet sich die Synchronmaschine durch einen hohen Wirkungsgrad bei niedrigen Volumen aus. Im Vergleich zu Gleichstrom-, Asynchron- und Reluktanzmaschinen weist sie das geringste Gewicht auf.

7.2.4 Permanentenerregte Synchronmaschine

Diese Bauform von Synchronmaschinen wird derzeit am häufigsten in Hybridfahrzeugen eingesetzt. Wegen des Einsatzes von Permanentmagneten zum Aufbau des Erregerfelds erzielt diese Antriebsvariante auch im Teillastbereich sehr hohe Wirkungsgrade. Mit Seltenen-Erden-Magneten (Neodym, hohe Energiedichte) sind sehr kleine Bauvolumen realisierbar. Dadurch wird der Motor aber teurer als ein Asynchronmotor. Weiterhin sind spezielle Technologien zur Montage von Rotor und Stator notwendig, durch welche die enormen Magnetkräfte beherrscht werden können.

Diese Bauart stellt auf Grund ihres hohen Wirkungsgrades zunehmend als optimale Antriebskonzeptvariante für Elektro- und Hybridfahrzeuge heraus. Dabei liegt bei modernen Motoren das Augenmerk auf der Systemabstimmung von Leistungselektronik, Motor und

⁸⁰ Vgl. Hackmann, Weil, zitiert nach Hofmann 2010, S. 121 f

Getriebe, um so ein Optimum in Bezug auf Gewicht, Leistungsdichte und Wirkungsgrad zu erreichen.

Aufbau

Der Stator ist ähnlich der einer Asynchronmaschine aufgebaut. Für die Anordnungen der Magnete im Läufer gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Neben der Innenläufervariante gibt es auch eine Außenläufervariante. Die Außenläuferbauweise ist eine spezielle Bauform der permanenten Synchronmaschinen. Hochpolig ausgeführt (acht oder mehr Polpaare) sind sie besonders geeignet, um der Forderung einer hohen Drehmoment- und Leistungsdichte bei kleinen Drehzahlen nachzukommen.

Im Vergleich zum Innenläufer, bei dem die Belastung auf die Magnete durch Fliehkräfte besonders berücksichtigt werden muss, werden die Magnete beim Außenläufer auf Grund der Glockenanordnung in ihrer Position gehalten.

Beim Innenläufer kann eine großflächige Wasserkühlung außen um den Stator vorgesehen werden, wodurch der Elektromotor stärker belastet werden kann. Im Gegensatz dazu ist die wärmeübertragende Fläche des Stators bei Außenläufern geringer.

Permanentmagnet Synchronmaschinen sind auf Grund ihres besonders hohen Wirkungsgrades (bis 94%), ihres einfachen mechanischen Aufbaus (keine Bürsten, keine Schleifkontakte, keine komplizierten Wicklungen) sowie durch die elektronische Regelung sehr gut für Fahrzeugantriebe geeignet.

Aufgrund der genannten Vorteile wird für automotiven Einsatzzwecke im PKW-Bereich nahezu ausschließlich dieser Maschinentyp eingesetzt.⁸¹

Die maximale Drehmomentabgabe des Drehstromsynchronmotors erfordert eine präzise berechnete Stromeinspeisung in die Statorwicklungen, abhängig vom Arbeitspunkt und von der augenblicklichen Rotorposition.

Bei der Rotorpositionsmessung wird die Stellung des Rotors zum Stator und die Drehrichtung präzise ermittelt (Auspendeln des Motors beim Abstellen, Start-Stopp-System).⁸²

7.2.5 Geschaltete Reluktanzmaschine

Sie ist eine Sonderbauform der Synchronmaschine. Sie wird auch SRM, switched reluctance machine, genannt.

Der Begriff Reluktanz stammt von der Kraft, die einen drehbar gelagerten Eisenstab in einem Magnetfeld in Richtung des geringsten magnetischen Widerstands (Reluktanz) be-

⁸¹ Vgl. Hofmann 2010, S. 124

⁸² Vgl. Bosch (3) 2008, S. 30 f,

wegt. Sie wird derzeit nicht in PKW-Serienhybridantrieben verwendet, sondern als Alternative in Industrie-, Servo-, und Fahrzeugantrieben eingesetzt.

7.2.6 Permanenterregte Transversalflussmaschinen

Sie unterscheiden sich von konventionellen Motoren durch die Führung des magnetischen Flusses. Im Gegensatz zur longitudinalen Führung bei herkömmlichen Maschinen ist hier die Flussrichtung quer zur Bewegungsrichtung (transversal).⁸³

Vorteile:

Das neuartige Design des Flusspfades, kombiniert mit dem Gebrauch neuer Magnetmaterialien, führt zu Hochleistungsantrieben mit einer 3-5 fach höheren Leistungsdichte im Vergleich zu konventionellen Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschinen.

Ein weiterer Vorteil ist der noch höhere Wirkungsgrad. Er resultiert aus zwei Gründen:

Reduzierte Kupferverluste, es gibt keinen Wicklungskopf.

Der magnetische und elektrische Kreis konkurrieren nicht um den gleichen Raum.

Nachteile:

Sehr komplexer Aufbau, teuer

Momentwelligkeit und Normalkraftschwankungen

Erhebliche Geräuschentwicklung

Nach einer weiter fortschreitenden Entwicklung wird sich dieser Antrieb in Zukunft insbesondere wegen der hohen Drehmomentdichte und kompakten Bauweise als Fahrantrieb, vorzugsweise als Radnabenantrieb anbieten. Die hohen Kraftdichten der Transversalflussmaschine bei langsamen Drehzahlen ist kein Getriebe erforderlich.

7.2.7 Gleichstrommaschine

Sie wird heute in PKW-Hybridantrieben nicht mehr eingesetzt. Der Einsatz eines Kommutators führt zu einigen Nachteilen der Gleichstrommaschine. Einerseits erhöht sich der Wartungsaufwand durch die Abnutzung der Kohlebürsten, andererseits baut die Maschine länger und schwerer als vergleichbare Drehstrommaschinen. Die maximale Drehzahl ist infolge des mechanischen Stromwenders begrenzt.

Auf Grund der höheren Kosten, des Wartungsaufwands und des im Vergleich zu den Drehstrommaschinen geringeren Wirkungsgrades wird die Gleichstrommaschine nicht mehr als Traktionsmaschine für Fahrzeuge vorgesehen.

⁸³ Vgl. Hofmann 2010, S. 126 f

8. Kopplung von Verbrennungskraftmaschine und Elektromotoren

Bei Serien-Pkw-Hybridfahrzeugen kommen vollautomatische stufenlose Getriebe (CVT, E-CVT) sowie speziell für Hybridantrieb modifizierte vollautomatische Wandler-Automatikgetriebe zum Einsatz. Bei Pkw Konzeptfahrzeugen, Bussen und Lkw sind auch automatisierte Schaltgetriebe im Einsatz.⁸⁴ Die Elektromaschine bzw. die Elektromaschinen können zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe platziert oder direkt im Getriebe angeordnet sein.

Getriebe sind wegen der Charakteristik von Verbrennungsmotoren notwendig. Motorleistung und Motordrehmoment entfalten sich drehzahlabhängig. Ein Getriebe muss zusammen mit der Motor- und Getriebesteuerung bzw. Hybridsteuerung dafür sorgen, dass der Motor - unabhängig vom Lastzustand und Geschwindigkeit – im jeweils günstigsten Drehzahlbereich arbeiten kann.

8.1 Stufenlose Getriebe

Stufenlose Getriebe von PKW-Hybridfahrzeugen können in CVT-Getriebe (Continuous variable Transmission) und leistungsverzweigte Getriebe eingeteilt werden.

CVT-Getriebe können für verschiedene Hybridantriebsarten eingesetzt werden. Beispielsweise kann der Elektromotor zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe angeordnet werden. Bei Start-Stopp-Funktionen muss jedoch die Betriebsbereitschaft des Getriebes gesichert sein. Kupplung und Variator müssen auch bei Stillstand des Verbrennungsmotors mit Öl versorgt werden. Daher ist eine elektrische Zusatzpumpe notwendig.

Vorteil von CVT Getrieben:

Der Vorteil von CVT-Getrieben liegt in der freien Wahl der Übersetzung und damit optimalen Lastpunkteinstellung an die Leistungsanforderung des Radantriebs.

Ein Beispiel eines in Serie gebauten parallelen Hybrid-Antriebsstranges mit CVT-Getriebe ist das Hybridsystem von Honda. Integrated-Motor-Assist Hybridsystem (IMA).

Abb. 8.1 zeigt ein CVT-Getriebe mit einem 10 kW Elektroantriebsmotor vom Honda Insight. Der zwischen Verbrennungsmotor und mechanischem CVT-Getriebe angeordnete Elektromotor ersetzt zugleich Starter, Generator und das Schwungrad für den 1,3 Liter Verbrennungsmotor.

⁸⁴ Vgl. Hofmann 2010, S. 343

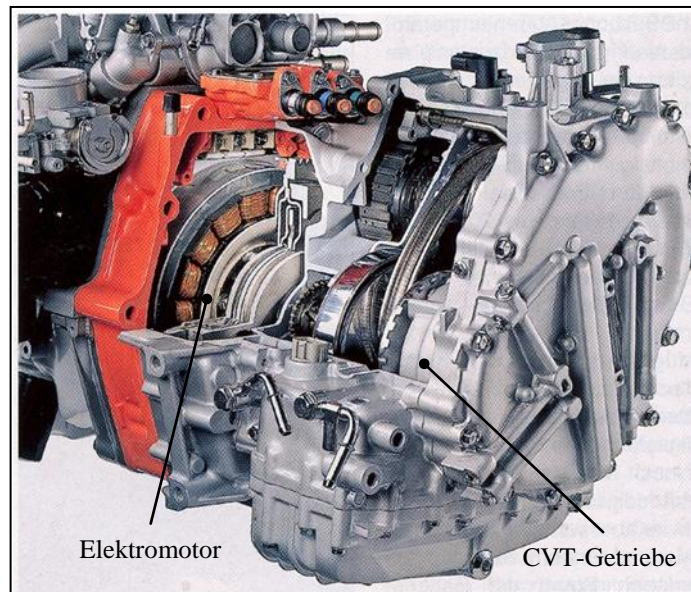


Abb. 8.1 Parallel-Hybridantrieb mit CVT Getriebe.⁸⁵

8.2 Leistungsverzweigte Getriebe

Leistungsverzweigte Getriebe bieten die Möglichkeit, den Aufwand an mechanischen Getriebekomponenten bei gleichen Fahrleistungen des Fahrzeugs im Vergleich zu Automatik- und automatisierten Schaltgetrieben gering zu halten.⁸⁶

Leistungsverzweigte Getriebe müssen in der Regel für das jeweilige Hybridkonzept eigens entwickelt werden und speziell für eine Klasse von Zielfahrzeugen ausgelegt werden. Es entstehen hohe Kosten, die auf die verkauften Fahrzeuge umgelegt werden müssen. In PKW-Serienhybridfahrzeugen werden elektrisch Leistungsverzweigte Getriebe eingesetzt. Sie bestehen aus der Kopplung von Getriebeelementen (Radsatz) mit einem elektrischen Variator.

Radsatz

Der Radsatz kann aus einer Anordnung eines oder mehrerer Planetenradgetriebe, einfachen Übersetzungen und Kupplungen bestehen.

Elektrischer Variator

Dieser setzt sich mindestens aus zwei elektrischen Maschinen mit zugehöriger Leistungselektronik zusammen.

Zusammen mit dem Radsatz übernehmen die beiden elektrischen Maschinen die Funktion eines elektrischen Variators. Mit der Wandlung von mechanischer in elektrische Energie wird die Einstellung unterschiedlicher Drehzahlen und Drehmomente der Wellen des Variators ermöglicht.

⁸⁵ Vgl. Technikprofi (2) 2009, S. 9

⁸⁶ Vgl. Hofmann 2010, S. 132 f

Abb. 8.2 zeigt den leistungsverzweigten Hybridantriebsstrang des Toyota Prius III, ab 2010 in Serie. Das Getriebe ist ein elektrisch leistungsverzweigtes E-CVT-Getriebe. Es besitzt ein Planetengetriebe mit zwei integrierten Elektromaschinen. Es ist ein sogenanntes Single-Mode-Getriebe, siehe auch Abschnitt 5.1.3. Durch die elektrische Regelung der Drehzahlen von einer Welle des Planetengetriebes erhält man ein elektrisches Stufenlosgetriebe mit unendlicher Spreizung und benötigt daher zum Anfahren keine Kupplung.

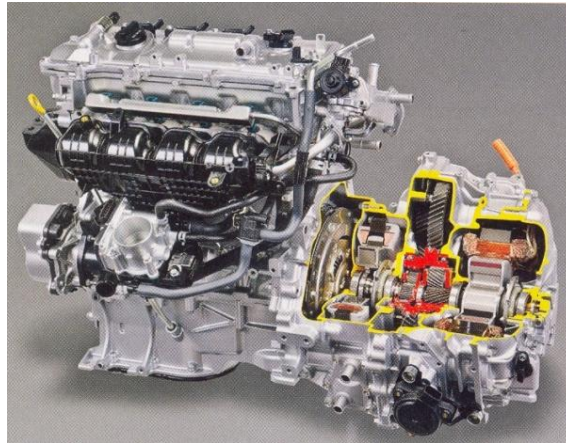
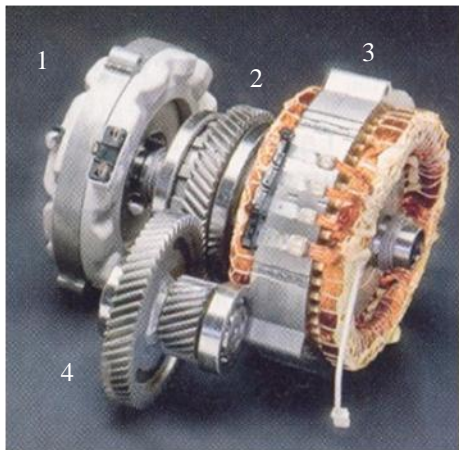


Abb. 8.2 – Toyota Prius 3-Hybridantrieb.⁸⁷

Abb. 8.3 zeigt das elektrisch leistungsverzweigte CVT-Getriebe (E-CVT) des Toyota Prius 3. Es besitzt ein Planetengetriebe mit zwei integrierten permanent erregten synchronen Elektromaschinen (Motorgeneratoren MG1, MG2).



- 1.....Motorgenerator 1, (42 kW)
- 2....Planetenradgetriebe mit zusätzlich außenverzahntem Hohlrad für den Achsantrieb.
- 3....Motorgenerator 2, (60 kW)
- 4....Stirnrad zum Achsantrieb

Abb. 8.3 – E-CVT-Getriebe.⁸⁸

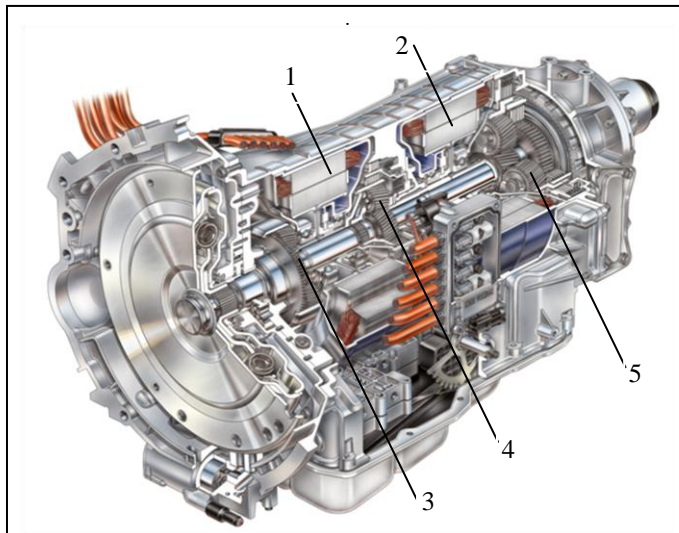
Motorgenerator 1 lädt die Traktionsbatterie auf, liefert elektrische Energie für den MG2. Er startet den Verbrennungsmotor und regelt über ein Stellmoment zusammen mit dem Planetengetriebe die Drehzahl des Verbrennungsmotors (optimaler Motorbetriebspunkt). Unter bestimmten Bedingungen (Fahrsituationen) läuft er auch rückwärts, siehe hierzu Abschnitt 5.1.3. Die Leistung beträgt 42 kW.

⁸⁷ Vgl. Technikprofi (3) 2010, S. 4

⁸⁸ Vgl. Technikprofi (3) 2010, S. 4 f

Motorgenerator 2 arbeitet beim Beschleunigen und beim rein elektrischen Fahren als Antriebsmotor und beim Bremsen als Generator. Die Leistung beträgt 60 kW.

Das Two-Mode-Getriebe des Mercedes ML 450 Hybrid und BMW X6 Active Hybrid. Kernstück des Hybridsystems ist das elektrisch leistungsverzweigte Two-Mode-Getriebe, welches im wesentlichen zwei E-Motoren, drei Planetensätze, eine Ölpumpe und vier Kupplungen besitzt. Es lassen sich zwei elektrisch variable Übersetzungen EVT1/EVT2 und 4 fixe Gänge wählen.⁸⁹



- 1...Elektromotor (Starten, Fahren)
- 2...Elektromotor (Anfahren)
- 3...Stufenplanetensatz
- 4...Stufenplanetensatz
- 5...Summationsplanetensatz

Abb. 8.4 Two-Mode Getriebe von GM.⁹⁰

Um die hohen Entwicklungskosten zu teilen, haben BMW, Daimler und General Motors eine Kooperation geschlossen und damit auch die Zahl der Fahrzeuge mit diesem entsprechend erhöht.⁹¹

Ein wesentliches Merkmal dieser Getriebe ist die Aufteilung der durch die Verbrennungskraftmaschine erzeugten Leistung auf einen mechanischen und elektrischen Pfad.

Bei seriellen Hybriden erfolgt die Übersetzung zwischen Motordrehzahl und Raddrehzahl in der Regel stufenlos über den elektrischen Kreis. Sie können auch als EVT-Getriebe (Electrical variable transmission) betrachtet werden.

⁸⁹ Vgl. Hofmann 2010, S. 292 f

⁹⁰ Vgl. http://gm.wieck.com/forms/gm/X07PT_AR012.jpg?download=029941

⁹¹ Vgl. Kirchner 2007, S. 581 f

8.3 Vollautomatische gestufte Automatikgetriebe

Automatikgetriebe mit Planetensätzen sind eine weitere Variante zur Ausführung von Hybridfahrzeugen. Da die Schaltvorgänge automatisiert ablaufen, eignen sie sich gut für Hybridanwendungen. Sie sind auf dem für Hybridfahrzeuge wichtigen amerikanischen Markt das wichtigste PKW-, Kleintransporter-, und Geländewagengetriebesystem. Der hydraulische Drehmomentwandler kann je nach Konzept (Mildhybrid, Vollhybrid mit Trennkupplung) durch die E-Maschine ersetzt werden. Dies führt zu einer Verbesserung des Getriebewirkungsgrades.

Abb. – 8.5 zeigt ein 7-Gang-Automatikgetriebe des parallelen Mild-Hybrid Mercedes S400 Hybrid mit Permanentmagnet-Synchronmaschine in Außenläuferbauweise. Leistung 15 kW, max. Drehmoment 160 Nm.

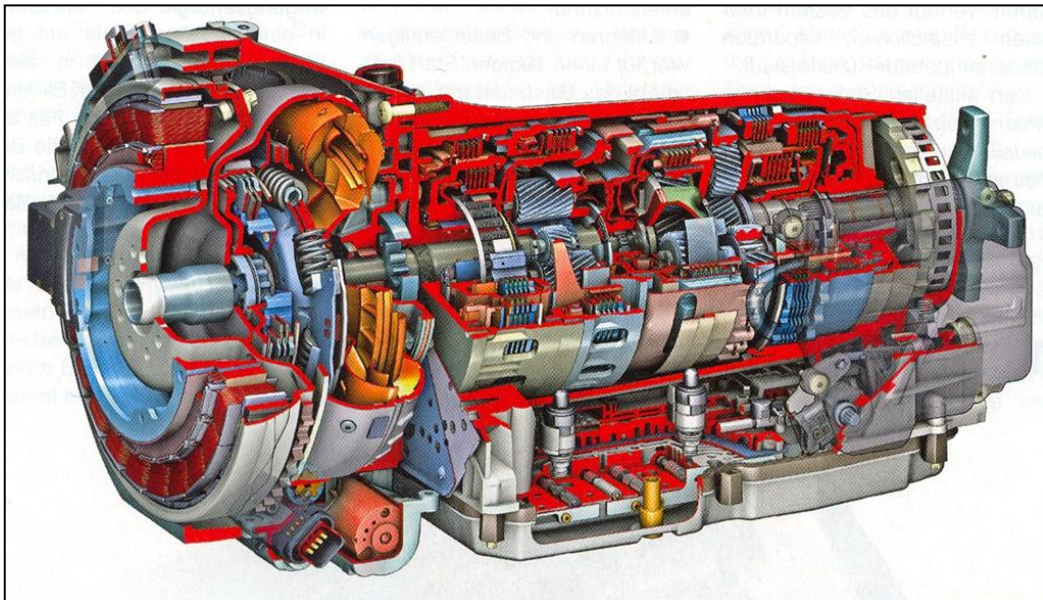


Abb. 8.5 7-Gang-Automatikgetriebe mit Motorgenerator.⁹²

Im parallelen Voll-Hybrid VW-Touareg wird ein 8-Gang Stufenautomat eingesetzt. Das Hybridmodul umfasst dabei in einem gemeinsamen Gehäuse eine dem Motor nachgeordnete, trockene Trennkupplung mit integriertem Torsionsdämpfer und hydraulischem Zentralausrücker sowie einen Elektromotor mit 34 kW mechanischer Leistung.

- Mit einer Trennkupplung nach dem Schwungrad kann die E-Maschine vom Verbrennungsmotor getrennt werden. Dies ermöglicht das rein elektrische Fahren.
- Der Verbrennungsmotor verfügt über keinen eigenen Startermotor. Er wird über die E-Maschine über die Trennkupplung mittels einer komplexen Prozedur aus dem Stand oder während des elektrischen Fahrens gestartet.
- Eine zusätzliche elektrische Ölpumpe wurde zur Aufrechterhaltung der Getriebeölversorgung bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor eingebaut.⁹³

⁹² Vgl. Technikprofi (4) 2010, S. 11

⁹³ Vgl. Hofmann 2010, S. 305 f

9. Energiespeicher für Kfz-Antriebe

9.1 Zweck der Energiespeicher

Energiespeicher dienen der Speicherung von Energie. Die gespeicherte Energie kann dann je nach Bedarf für den Fahrzeugantrieb und für verschiedene Nebenverbraucher genutzt werden. Energiespeicher lassen sich nach der Art der gespeicherten Energie unterscheiden. Die Abbildung zeigt eine Auswahl von Formen der Energiespeicherung, die in Kraftfahrzeugen (Pkw, Nkw) bereits verwendet oder in Zukunft zur Anwendung kommen können.

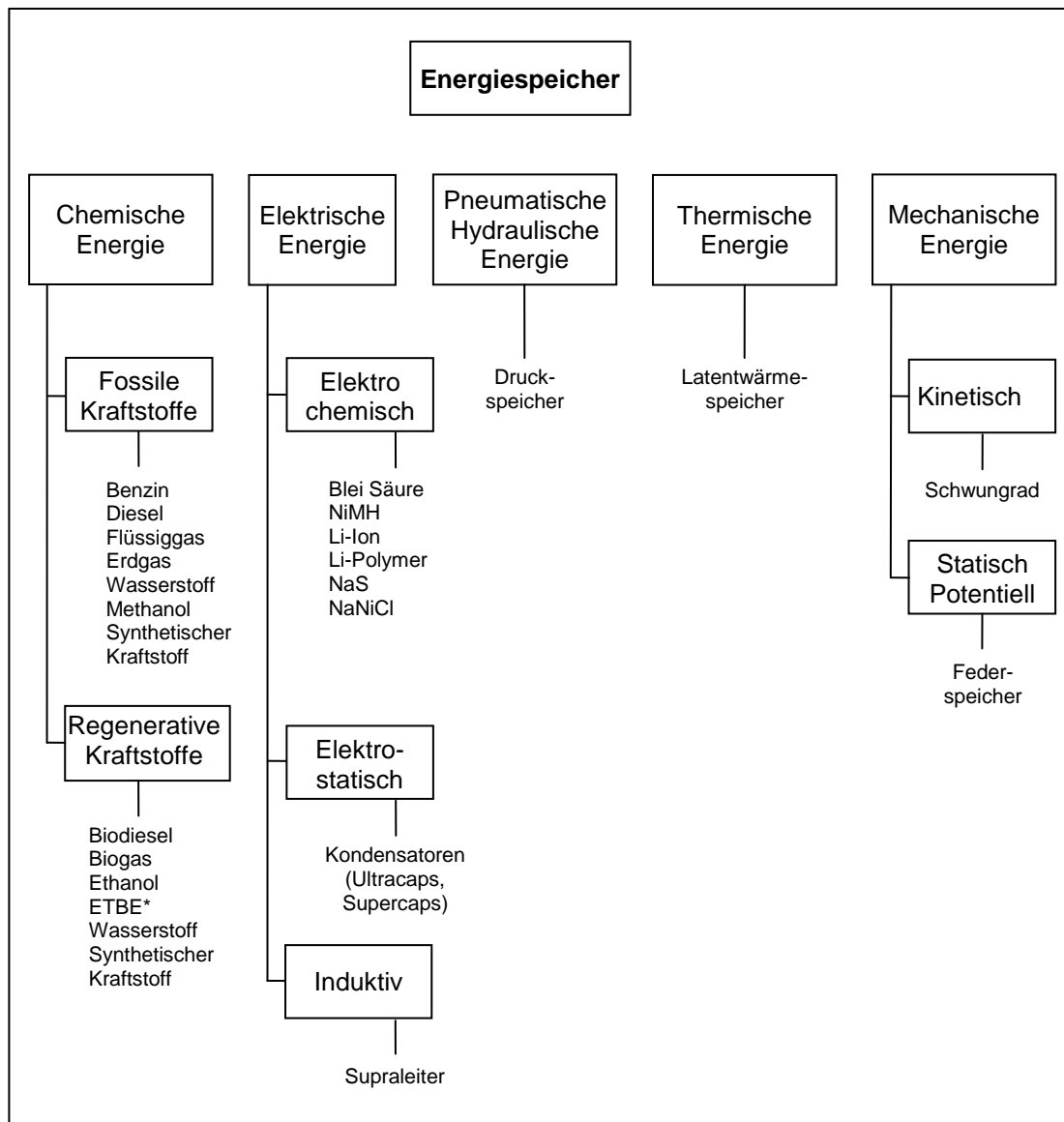


Abb. – 9.1 Mögliche Formen der Energiespeicherung ⁹⁴

* ETBE....Ethyl-tertiär-butyl-ether (Ottokraftstoffzusatz)

⁹⁴ Vgl. Caldevilla zitiert nach Hofmann 2010, S. 147

Es sind nicht alle Energiespeicher für den Fahrzeugeinsatz geeignet. Im PKW-Serienhybridfahrzeugen werden derzeit nur elektrochemische Speicher (Akkumulatoren), eingesetzt.

9.2 Traktionsbatterien (Akkumulatoren)

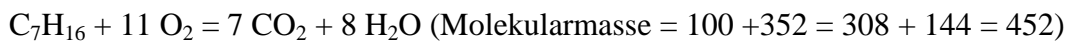
Allgemein

Bei elektrischen Kfz-Antrieben war von Beginn an bis heute die Batterie der begrenzende Faktor. Dies ist einer der Hauptgründe, dass sich Otto- und Dieselmotoren als Antriebskraftmaschinen durchsetzen konnten, siehe Kapitel 2.1. Der Elektromotor war und ist ihnen in Wirkungsgrad und Drehmomentverhalten immer schon überlegen.

Das Problem ist die zu speichernde Energiemenge. Kohlenwasserstoffe (Benzin, Diesel) haben eine große Energiedichte, weil der schwerere Reaktionspartner (Sauerstoff) der Umgebung entnommen werden kann und das Reaktionsprodukt in die Umgebung abgeführt wird.⁹⁵

Beispiel: Heptan C_7H_{16}

Heptan wurde als typischer Kraftstoff angenommen, weil sein Molekulargewicht eine Runde Zahl ist.⁹⁶ Die relative Atommasse in u entspricht der Molmasse M in g/mol.



Nur 22 % der Reaktionsmasse müssen mitgeführt werden und die werden noch dazu immer weniger, weil das Reaktionsprodukt in die Umgebungsluft abgegeben wird.

Beispiel: Zink-Luft-Batterie



Vor der Reaktion müssen über 60 % mitgeführt werden, nach der Reaktion sogar 100 %.

Energievergleich zwischen konventionellen Kraftstoffen zu gängigen Batteriesystemen.

Speichersystem	Energieinhalt Wh/kg
Fossile Kraftstoffe (Benzin, Diesel)	12.000
Moderne Blei-Säure Batterie	30
Nickel-Metall-Hydrid-Batterie (NiMH),	65
Lithium-Ion-Batterie (Li-Ion)	100

Tabelle 9.1 – Spezifischer Energieinhalt bei 50 % Ladezustand.⁹⁷

⁹⁵ Vgl. Fiola 2006, S. 53

⁹⁶ Vgl. Europa (2) 2009, S. 29

⁹⁷ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 53

In bestehenden Serien-Hybridfahrzeugen wurden bisher Metall-Hydrid-Batterien verwendet. Zukünftige Hybridfahrzeuge werden vermehrt auch mit Li-Ionen Batterien betrieben werden.

Je nach Fahrzeugtyp (Elektrofahrzeug, Mild-Hybrid, Voll-Hybrid, Hybrid-Bus, Plug- In-Hybrid) unterscheiden sich die verwendeten Batterien bezüglich Energie- und Leistungsanforderungen. Die Batterieauslegung für die jeweilige Anwendung erfolgt unmittelbar aus den Kundenanforderungen bezüglich Energie, Leistung, Spannungsbereich und Bauvolumen.

Daraus leiten sich Forderungen an das Zell- und Moduldesign ab. Der Hybrideinsatz erfordert einen Leistungstyp, eine Batterie, die einen begrenzten Energieinhalt vorbehält, dafür aber in der Lage ist, kurzzeitig hohe Ströme zu liefern. Bei Hybridfahrzeugen steht die Leistung des Batteriesystems im Vordergrund. Das Energiespeichervermögen selbst spielt hingegen eine untergeordnete Rolle, da die Batterie nur für relative kurze Lade- und Entladevorgänge mit allerdings hoher elektrischer Leistung benötigt wird. Rein elektrischer Betrieb wird nur für „kurze Zeit“ benötigt.

Rein elektrische Fahrzeuge erfordern Energietypen, Batterien mit großem Energieinhalt. Bei Elektrofahrzeugen spielt die mit einer Batterieladung erzielbare Reichweite eine sehr wichtige, den Gebrauchswert bestimmende Rolle. Angestrebt wird ein großes Energiespeichervermögen bei geringem Gewicht, geringem Volumen und niedrigen Kosten.

Vor allem durch die Wahl der Grundmaterialien und der aktiven Materialien (aktive Masse) für die positive Elektrode (Kathode) und negative Elektrode (Anode) der Zelle und deren Stärke kann zwischen der Energie- oder Leistungstypen variiert werden. Ist die aktive Masse dick, lässt sich viel Energie speichern. Auf gleichem Bauraum kann man aber weniger Elektroden, weniger Oberfläche, unterbringen.

Zellbauarten

Zylinderische Zellen haben Vorteile in der Fertigung. Die angewendete Wickeltechnik erlaubt hohe Fertigungspräzision und kurze Fertigungszeiten.

Quaderförmige (prismatische) Zellen lassen sich platzsparender zu einem Stack stapeln. Ganz flache Zellen werden auch Pouch-Zellen genannt. Diese müssen vor Luftzutritt geschützt werden und werden in Folien eingeschweißt.

Sicherheit

Für einen sicheren Fahrzeugbetrieb sind redundante Sicherheitssysteme vom Batterie-Managementsystem bis hin zur Notabschaltung auf Zell-, Modul-, und Systemebene vorgesehen. Die Batterie-Managementsysteme sind mit den Crashsensoren des Fahrzeuges verbunden. Bei einem Unfall wird die Batterie blitzschnell spannungsfrei geschaltet.

Für die Herstellung von Traktionsbatterien gibt es derzeit noch keine Normen für Standardzellen. Heute sind Batteriesysteme noch spezifische Einheiten für ein spezielles Fahrzeug. Ein einheitlicher Standard könnte dazu führen, dass mehrere Lieferanten für verschiedene Hersteller große Stückzahlen erzeugen könnten. Dies könnte dann auch den hohen Batteriepreis absenken.

Anwendung	Elektrische Reichweite	Energie- und Leistungsanforderungen
„Mild Hybrid“ PKW	Keine elektrische Reichweite	0,5 bis 1 kWh / < 20 kW
„Full Hybrid“ PKW	Geringe elektrische Reichweite	1 bis 3 kWh / 25 bis 50 kW
Hybridbusse	Begrenzte Reichweite	> 10 kWh / > 80 kW
Elektrofahrzeug	> 150 km Reichweite	> 20 kWh / > 40 kW

Tabelle 9.2 – Anforderungen an Batteriesysteme.⁹⁸

9.2.1 Kenngrößen von Traktionsbatterien

Für die technische Auswahl einer Traktionsbatterie für ein Hybridfahrzeug sind nachstehende Eigenschaften sehr wichtig:⁹⁹

Spezifische Energie Wh/kg

Hiermit ist die auf Gewicht bezogene Energiefähigkeit des Batteriesystems gemeint. Die spezifische Energie spielt besonders dann eine Rolle, wenn lange kontinuierliche Entlade- und Ladevorgänge gefordert sind.

Im Kraftfahrzeugbereich ist besonders die elektrische Reichweite wichtig.

Energiedichte Wh/l¹⁰⁰

In diesem Wert kommt der Volumenbedarf zum Ausdruck, der für die Unterbringung des Batteriesystems benötigt wird. Besonders bei Batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist die Energiedichte ein entscheidender Wert für die Autonomie des Fahrzeuges.

Um große Reichweiten zu ermöglichen, müssen Batterien für Elektroautos möglichst viel Energie speichern können. Daher hat die Energiedichte bei reinen Elektrofahrzeugen Vorrang.

⁹⁸ Vgl. Schäfer 2007, S. 310

⁹⁹ Vgl. Schäfer 2007, S. 310 f

¹⁰⁰ Vgl. Hofmann 2010, S. 149 f

Spezifische Leistung W/kg

Sind die geforderten Lade- und Entladezeiten kürzer als 1 Minute, gewinnt die spezifische Leistung eine besondere Bedeutung.

Im Kraftfahrzeugbereich sind vor allem die Start-Stopp-Vorgänge sowie die für Hybridtechnologien typischen Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgänge relevant. Die Akkus müssen in kurzer Zeit viel Energie speichern und abgeben können.

Leistungsdichte W/l

Ein hoher Wert für die Leistungsdichte ist insbesondere bei Hybridfahrzeugen erwünscht, bei denen die Unterbringung von Einzelsystemen unter begrenztem Bauraum-Verhältnissen mit Problemen verbunden ist.

Energiedurchsatz Wh

Bei Hybridfahrzeugen definiert der Energiedurchsatz zusammen mit einem entsprechenden Lastzyklus die Lebensdauieranforderung an die Zelle. Durch die Angabe des Energiedurchsatzes wird die Batteriespannung als wesentlicher Faktor für die Lebensdauer berücksichtigt (früher Kapazitätsdurchsatz Ah). Befindet sich die Hochvoltbatterie im Dauereinsatz, wie es bei Hybridfahrzeugen während der regelmäßigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen der Fall ist, wird der spezifische Energiedurchsatz zu einem entscheidenden Kriterium für die Auswahl der Energiespeichersystems.

Beim konventionellen Kraftfahrzeug werden an die 12V-Starterbatterie keine hohen Anforderungen an den Energiedurchsatz gestellt, ausgenommen Fahrzeuge mit Start-Stopp-System.

Kapazität (Ah)¹⁰¹

Sie gibt an welche Ladung (Strommenge) eine Zelle oder ein Batteriesystem unter bestimmten Bedingungen aufnehmen oder abgeben kann.

Hybridfahrzeug-Batteriezellen haben kleine Kapazitäten, aber größere Leistungsfähigkeit. Es werden nur kleine Energiemengen bewegt.

Elektrofahrzeug-Batteriezellen haben große Kapazitäten, aber kleinere Leistungsfähigkeit.

$$E_E = K \cdot U$$

(19)

E_EElektrische Energie (Ws)

KKapazität (As)

UNennspannung (V)

Nennspannung

Je höher die Nennspannung einer Zelle, desto höher ist die bewegte Energie.

¹⁰¹ Vgl. Bosch (2) 2007, S. 420

Nickel-Metall-Hydrid-Zelle, Zellenspannung 1,2 V

Lithium-Ion-Zelle Zellenspannung, 3,6 V

Kalendarische Lebensdauer (Lebenserwartung)

Von Batteriesystemen in Hybridfahrzeugen wird allein aus Kostengründen eine lange Lebensdauer erwartet, die der des Kraftfahrzeugs entspricht. Dies bedeutet in der Regel eine Zeitspanne von mehr als 10 Jahren. Wichtiger Vergleichsfaktor ist hierbei die Anzahl der Ladezyklen.

Ladezyklen

Es bezeichnet die Anzahl der kompletten Be- und Entladungen die eine Batterie erlaubt, bis nur noch 80 % ihrer Ursprünglichen Leistung abgibt. Hat der Akku also 20 % seiner Leistung verloren, gilt er im Fahrzeugbereich als nicht mehr einsetzbar.

Ladedauer beim Plug in Hybrid

Das Batteriesystem soll auch bei kürzeren Ladestopps möglichst viel Energie aus dem externen Netz aufnehmen können. Zu beachten ist, dass an einer Haushaltssteckdose jedoch nur 3,7 kW elektrische Leistung zur Verfügung stehen.

9.2.3 Nickel-Metall-Hydrid-Batterien (NiMH)

Das Nickel-Metall-Hydrid-Batteriesystem (NiMH) hat sich in den letzten Jahren als zuverlässiges (Toyota Prius) und leistungsfähiges System für Pkw-Hybridfahrzeuge erwiesen. Das System erfüllt die Forderungen wie hohe Leistungsdichte, Robustheit und Sicherheit. Aus chemischer Sicht gilt das Nickel-Metall-Hydrid-Batteriesystem als weitgehend ausgereift.¹⁰²

Aufbau

Als aktives Elektrodenmaterial wird Nickelhydroxid sowie ein Wasserstoff speicherndes Material (Mischmetall) verwendet. Es ist eine Legierung mit hohem Gehalt an Lanthan, Cer und Neodym. Mit den verwendeten Materialien erreicht man hohe Leistungsdichten. Der alkalische Elektrolyt (wässrige Kalilauge KOH) nimmt nicht an den Elektrodenreaktionen teil. Die Leerlaufspannung beträgt abhängig vom Ladezustand ca. 1,25-1,35 V. Die Zelle wird bei leichtem Wasserstoffüberdruck betrieben und besitzt ein Überdruckventil oder eine Berstscheibe. Im Betrieb muss darauf geachtet werden, dass keine zu hohen Überladungen stattfinden und gute Belüftungsmöglichkeiten gegeben sind.

Die Energie- und Leistungsfähigkeit wird von der Menge des eingebrachten Aktivmaterials sowie der technischen Auslegung der Elektroden- und Zellgeometrie bestimmt.

¹⁰² Vgl. Schäfer 2007, S. 311

Eigenschaften von Nickel-Metall-Hydrid-Batterien (NiMH)

- spezifische Entlade- und Ladeleistung bis 1300 W/kg
- trotz Betrieb im teilgeladenen Zustand kein generelles Lebensdauerproblem
- abhängig von der Entladetiefe ist ein hoher Energiedurchsatz möglich.
Energetischer Wirkungsgrad ohne Heizung 60-85 %¹⁰³
- robust gegen kurzzeitige Überladung und Tiefentladung
- gute Ladungsaufnahme auch bei niedrigen Temperaturen
- hohe passive Sicherheit
- relativ hohes Systemgewicht
- Max. Energieeffizienz auf 92 % beschränkt
(Ladezustandsbestimmung schwierig, Spannungshysterese)
- Hohe Selbstentladung
- Starker Leistungsabfall bei tiefen Temperaturen.
- Niedrige Zellenspannung, große Module

Abb. 9.2 zeigt das Luftgekühlte NiMH-Hochvoltbatteriesystem, des Toyota Prius III und ein Einzelmodul. Insgesamt sind 28 Batteriemodule in Reihe geschaltet. Batterien dürfen nicht zu lange über 40 °C betrieben werden. Ihre Lebensdauer sinkt dadurch erheblich. Die Temperatur des Batteriesystems wird von Sensoren überwacht. Aus Lebensdauergründen werden die Batterien auch nicht voll geladen, sondern in einem Bereich von 55 % (+/- 5%). Der Ladehub beträgt dann 20 %. Sensoren prüfen den Ladezustand (SOC = State of Charge) und den Alterungszustand (SOH = State of Health, „Gesundheitszustand“). Die Batteriegleichspannung wird für den Drehstromantrieb in einem DC/AC Wandler auf max. 650 Volt hinaufgesetzt, siehe hierzu Abschnitt 9.2.5.

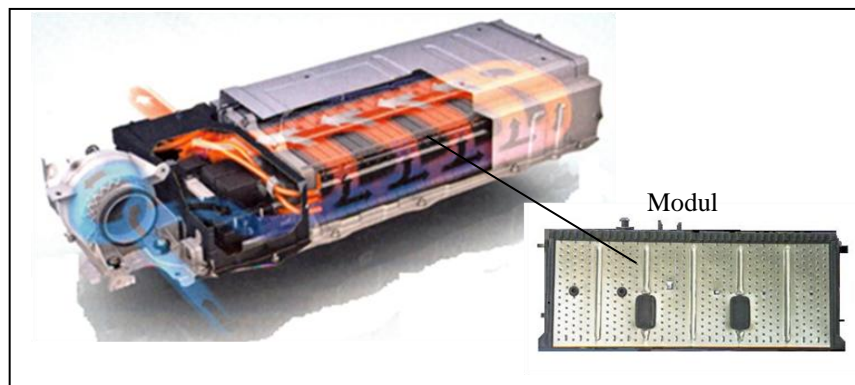


Abb. 9.2 – Luftgekühltes NiMH-Hochvoltbatteriesystem.¹⁰⁴

¹⁰³ Vgl. Bosch (1) 2003, S.723

¹⁰⁴ Vgl. Technikprofi, (5) 2010, S. 4

Batterietyp	NiMH (Luftgekühlt)
Zellanzahl	168 zu je 1,2 Volt
Modulanzahl	28 zu je 6 Zellen
Gesamtspannung	202 Volt
Kapazität	6,5 Ah
Max. Leistungsabgabe	27 kW
Batteriegewicht (System)	ca. 40 kg

Tabelle 9.3 – Technische Daten der NiMH-Batterie des Toyota Prius 3.¹⁰⁵

9.2.4 Li-Ionen Batterie

Lithium-Ionen-Batteriesysteme erlauben gegenüber NiMH-Systemen nochmals höhere Energie- und Leistungsdichten. Im Jahre 2009 wurde das Lithium-Ionen-Batteriesystem zum ersten Mal in einem Hybridfahrzeug, dem Mercedes S 400 Hybrid, in der Serie eingesetzt. Die Zellen werden nicht etwa in Fernost gefertigt, sondern von der Fa. JCS in Frankreich (Joint Venture, Fa. Johnson Controls und Fa. Saft). Weltweit arbeiten alle Batterie- und Fahrzeughersteller an der Weiterentwicklung dieser Systeme.

Aufbau

Das Lithium-Ionen-Batteriesystem verwendet kathodenseitig spezielle Metalloxide (Ni, Mn, Co, Al), oder Mischungen aus diesen, die Lithium Ionen einlagern können. Als Anodenmaterial wird Graphit verwendet. Auch dort kann sich Lithium einlagern. Der Elektrolyt ist ein Gemisch aus organischen Lösungsmitteln mit einem Li-Leitsalz.

Abhängig von den verwendeten Elektrodenmaterialien liegt die Nennspannung ca. bei 3,3 V bis 3,8 V pro Zelle.

Die Energie- und Leistungsfähigkeit wird von der Art und Menge des eingebrachten Aktivmaterials sowie der technischen Auslegung der Elektroden- und Zellgeometrie bestimmt.

Eigenschaften von Lithium-Ionen Batterien

- Hohe spezifische Entlade- und Ladeleistung bis zu 3000 W/kg (auf Zellebene)
- Hohe Leistungsdichte bis zu 6000 W/l (auf Zellebene)
- Hoher Energiedurchsatz möglich (abhängig von der Entladetiefe)
- Hohe Zellspannung, Serienschaltung ergibt kleinere Module bei höherer Spannung
- Nahezu 100 % Ladewirkungsgrad
- Sehr gutes Langzeitverhalten (Lebensdauer und Zyklen)
- Sensibel gegen Überladung und Tiefentladung
- Einzelüberwachung jeder Zelle zur Vermeidung von Überladung und Überhitzung notwendig.

¹⁰⁵ Vgl. Technikprofi (5) 2010, S. 4 f

Abb. 9.3 zeigt das Lithium-Ionen-Batteriesystem des Mercedes S400 Hybrid. Die kompakte Li-Ionen-Batterie ist im Motorraum angebracht und benötigt nicht mehr Platz als die gewöhnliche 12V-Starterbatterie. Die Rundzellen VLP6 sind auf hohe Leistung ausgelegt. Der Separator aus Kunststoff hat eine zusätzliche Sicherheitsfunktion. Bei 150 °C schmilzt der Kunststoff und es können keine Elektronen mehr durchwandern.

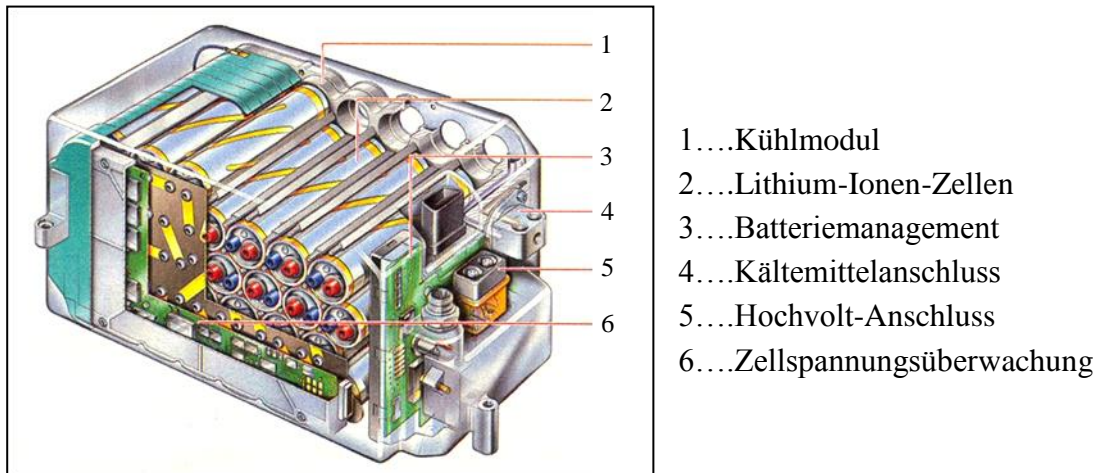


Abb. - 9.3 Klimatisierte Li-Ionen Batterie Mercedes S400 Hybrid.¹⁰⁶

Batterietyp	Li-Ion
Kühlung	Kältemittel R134 a,
Zellanzahl	35 zu je 3,6 Volt
Gesamtspannung	126 V (144-87,5V)
Kapazität	6,5 Ah
Energie	880 Wh
Max. Leistungsabgabe	19 kW/10 s

Tabelle 9.4 - Technische Daten der Li-Ion-Batterie des Mercedes S400 Hybrid.¹⁰⁷

¹⁰⁶ Vgl. Auto Motor und Sport (1) 2009, S. 23

¹⁰⁷ Vgl. Hofmann 2010, S. 287

9.2.5 Batteriesystem (Bordnetz)

Ein Mild- oder Full-Hybridfahrzeug benötigt für seine Funktionen eine elektrische Leistung von ca. 8 bis 60 kW. Diese kann auf der 14V-Spannungsebene nicht sinnvoll zur Verfügung gestellt werden. Daher wird zusätzlich ein Hochvoltsystem von 42 bis 750 V installiert. Zur Versorgung der 14V-Verbraucher im Fahrzeug kann jedoch nicht auf das Standard 14V-Bordnetz verzichtet werden (Kosten, Sicherheit).

Aufgaben

- Speicherung von überschüssiger elektrischer Energie aus dem Triebstrang
- Abgabe elektrischer Energie an den Antriebsstrang
- Versorgung der elektrischen Hochvolt- und Standardverbraucher.

Ein Batteriesystem von Mild- und Fullhybridfahrzeugen besteht in der Regel aus der Traktionsbatterie, dem Batteriemanagementsystem, der Kühlung, einer Gasableitung und der Schutz- und Sicherungseinheit.

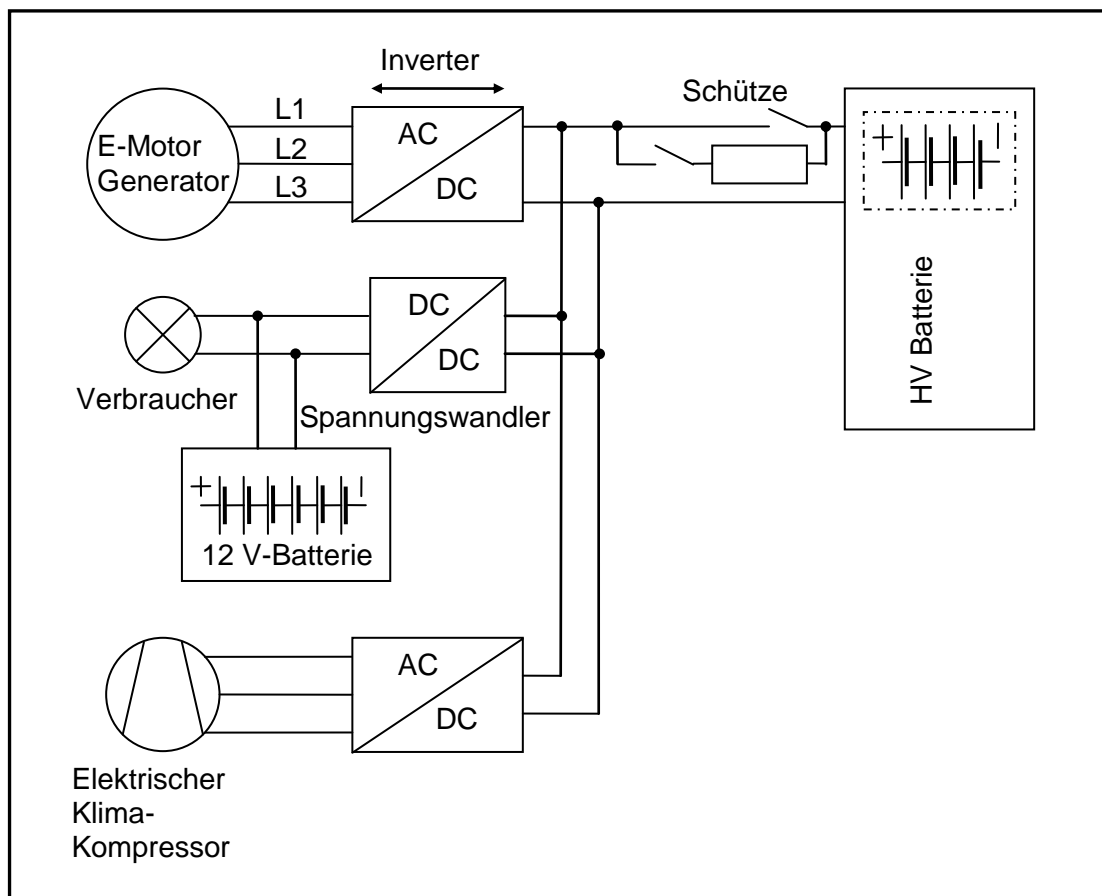


Abb. - 9.4 Aufbau eines Hochvoltbordnetzes für einen parallelen Hybrid.¹⁰⁸

¹⁰⁸ Vgl. Bosch (3) 2008, S. 45 f

Durch das Hochsetzen der Traktions-Batteriespannung auf ein höheres Niveau kann die Zellenanzahl der Batterie klein gehalten werden. Ein Betrieb mit hoher Spannung und kleinen Strömen ist möglich. Dies ergibt kleinere Leiterverluste. Die Traktionsspannung kann unabhängig von der Batteriespannung gewählt werden.¹⁰⁹

Der Inverter (Pulswechselgleichrichter) erzeugt zur Versorgung der Elektroantriebsmaschine aus einer Gleichspannung ein Drehstromsystem mit variabler Stromstärke und Drehfrequenz. Ein DC/DC-Wandler überträgt die elektrische Energie von einem Gleichspannungsniveau auf ein Anderes.

Mittels Schützen und einer geeigneten Steuerlogik wird das Bordnetz bei einem Unfall oder beschädigten Elektrokabel außerhalb der Batterie spannungsfrei geschaltet.

Ein Batteriemanagementsystem innerhalb der Hybridsteuerung überwacht permanent verschiedene Parameter und Grenzen des Batteriesystems. Es regelt auch die Kühlung (Temperatur) des Batteriesystems, die für die Funktionalität und Lebensdauer der Hochvoltbatterie mitentscheidend ist.

¹⁰⁹ Vgl. Hofmann 2010, S. 143

9.3 Kondensatoren

Doppelschicht-Kondensatoren, die auch Supercaps oder Ultracaps genannt werden sollen künftige Pkw-Hybridautos und Brennstoffzellenautos wirtschaftlicher machen und deren Fahrleistungen verbessern.

Die Hochleistungs-Kondensatoren werden mit überschüssiger Energie oder mit beim Abbremsen des Fahrzeugs freiwerdender Energie (Rekuperation) aufgeladen. Beim Beschleunigen werden die Kondensatoren wieder über den Elektroantriebsmotor entladen. Dies bewirkt eine zusätzliche kurze Antriebsleistung (Schub). Bei Bussen wird diese Technik schon angewendet.

Anders als bei Batteriesystemen unterliegen solche Kondensatoren keinem Verschleiß. Kondensatoren könnten daher als Puffer praktisch unbegrenzte Lebensdauer ermöglichen, denn hier laufen keine elektrochemischen Reaktionen ab, es werden lediglich Ladungen getrennt. Sie speichern die Energie im Gegensatz zu elektrochemischen Energiespeichern wie Batterien und Akkus elektrostatisch.

Das Dielektrikum ist nur wenige Atomlagen dick und ist in der Lage, eine äußerst große Elektrodenoberfläche zu trennen. Es handelt sich wie bei Elektrolytkondensatoren um gepolte Bauelemente. Supercaps können zeitlich begrenzt hohe Leistung bereitstellen. Aufgrund ihres kleinen Innenwiderstandes ($<1\text{ m}\Omega$) kann man kurzzeitig hohe Ströme entnehmen.¹¹⁰

Die Kapazität solcher Ultracaps, die von deren Oberflächengröße und Schichtdicke abhängt, ist enorm. Die Kapazität liegt zurzeit bei 1 bis 50 F bei einer Spannungsfestigkeit von ca. 2,5 Volt. Der Vorteil von Doppelschicht-Kondensatoren ist die sehr hohe spezifische Leistung (W/kg) bei fast unbegrenzt hohen Ladezyklen (500.000). Die hohe Energiedichte ($>4\text{ Wh/kg}$) ermöglicht die Anwendung als Energiespeicher (Puffer) von Verbrauchern die kurzzeitig einen hohen Strom benötigen.

9.4 Schwungradspeicher

Schwungradspeicher haben sich aufgrund ihrer geringen spezifischen Energie und des möglichen Gefahrenpotentials bei Unfällen bislang im Pkw-Fahrzeugsbereich nicht durchgesetzt. Im Motor-Rennsport werden Schwungradenergiespeicher die mit einem elektrischen Motor-Generator kombiniert sind vereinzelt eingesetzt z.B. Porsche 911 GT3 Hybrid.

¹¹⁰ Vgl. Babiel 2007, S. 30 f

Die im Schwungrad speicherbare Energie hängt linear von seiner Massenträgheit und quadratisch von seiner Drehzahl ab. Aus diesem Grund wird die Drehzahl sehr hoch gewählt.

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (20)$$

E....Rotationsenergie (J)

J.....Massenträgheitsmoment (kgm²)

ωWinkelgeschwindigkeit (rad/s)

Das Massenträgheitsmoment und die Drehzahl sind über die Fliehkraftbelastung voneinander abhängig. Bei der Steigerung des Massenträgheitsmomentes über den Durchmesser nimmt auch die Fliehkraft zu. Die beiden Größen müssen abhängig vom verwendeten Rotormaterial und dessen Festigkeit (Stahl, Faserverbund) aufeinander abgestimmt werden.

Eigenschaften

- Geringe spezifische Energiedichte
- Hohe spezifische Leistungsdichte
- Hohe Lade- und Entladeleistung
- Betriebstemperatur ist höher als bei Batteriesystemen
- Hohe Zyklenfestigkeit
- Rotorgehäuse meist evakuiert
- Im Schadensfall soll die gespeicherte Energie im Gehäuse abgebaut werden.
- Reaktionskräfte müssen beim Be- und Entladen des Speichers und Präzessionskräfte bei Fahrzeugbewegungen ausgeglichen werden.

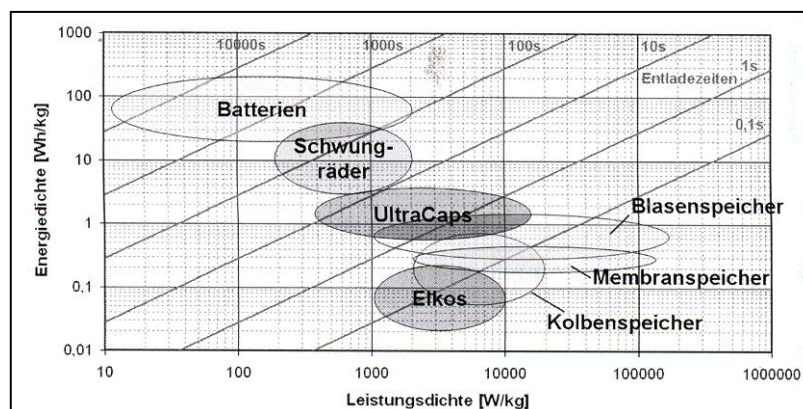


Abb. 9.5 - Ragone Diagramm verschiedener Energiespeichersysteme ¹¹¹

¹¹¹ Vgl. Hofmann 2010, S. 194

10. Nebenaggregate

Zusätzlich zu den Änderungen im Antriebsstrang sind bei Hybridfahrzeugen, speziell bei Fahrzeugen die rein elektrisch fahren können (Full-Hybrid) Modifikationen bei den Nebenaggregaten erforderlich. Bei konventionellen Personenkraftfahrzeugen wird der Großteil der Nebenverbraucher bei laufendem Motor über einen Riementrieb, Rollenkette oder Zahnräder mechanisch angetrieben.

Bei Hybridfahrzeugen müssen die Kühlmittelpumpe des Verbrennungsmotors und Getriebes, der Klimakompressor, die Servolenkung, die Getriebeölpumpe, der Bremskraftverstärker auch bei Motorstillstand funktionieren. Deshalb sind diese Systeme elektrifiziert. Der Energieverbrauch der Nebenverbraucher muss minimiert werden, damit die motorischen Verbrauchsabsenkungspotentiale und die durch die verschiedenen Hybrid-Betriebsmodes erzielten Kraftstoffeinsparungen durch einen Mehrverbrauch nicht ausgeglichen werden.

Das Betriebsbremssystem kann für das regenerative Bremsen (Rekuperation) speziell ausgelegt werden. Damit der Fahrer beim Verzögern nicht zu stark mit der Reibbremse verzögert, wird ein „synthetischer“ Pedalgedrückt erzeugt. Die Verzögerung wird durch verstärkte Rekuperation konstant gehalten.

10.1 Antriebsmanagement

Das Antriebsmanagement (Hybridsteuerung) koordiniert sämtliche Funktionen der Antriebsstrang-Einzelkomponenten bzw. Teilsysteme in Abhängigkeit vom Fahrerwunsch und den Betriebsbedingungen.

Basis ist eine Betriebsstrategie, die neben der primären Erfüllung der Fahrervorgaben auch Ziele, wie minimalen Kraftstoffverbrauch und Emissionen oder Komfortwünsche verfolgt. Dabei müssen bestimmte Bedingungen wie z. B. Ladezustand und Alterungszustand der Traktionsbatterie, maximale und minimale Temperaturen usw. berücksichtigt werden.¹¹²

Durch die Betriebsstrategie wird in erster Linie das Zusammenspiel zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Elektromotor bzw. Generator geregelt. Sie regelt die Energieerzeugung und den Energieverbrauch.

Da in einem PKW-Hybridfahrzeug zwei Energiespeicher (Kraftstofftank, Traktionsbatterie) und zwei Energiewandler (Verbrennungsmotor, Elektromotor) verwendet werden, kann der Verbrennungsmotor in bestimmter Grenzen unabhängig vom Fahrerwunsch (Drehmomentanforderung, Gaspedalstellung) in verbrauchsgünstigen Bereichen

¹¹² Vgl. Hofmann 2010, S. 207 ff

betrieben werden. Die Differenzleistung erzeugt der Elektromotor für den Antrieb bzw. der Generator zur Batterieladung.

Diese Eigenschaft des Hybridantriebes und Komfortwünsche des Fahrers werden von der Hybridsteuerung für die Koordination (Regelung, Steuerung) des Hybridfahrzeuges genutzt. Dabei müssen viele Randbedingungen der Einzelnen Teilsysteme und Einzelkomponenten berücksichtigt werden.

Beispiele:

- Ladezustand der Hochvoltbatterie SOC (State of Charge)
Das SOC-Fenster beträgt ca. 50-70 %.
- Energiedurchsatz, Zyklisierung, Alterung und Temperatur der Batterie
- Elektromotor-, Verbrennungsmotor- und Innenraumtemperatur
- Niedervoltstromnetz

11. Kraftstoffverbrauch bei Hybridfahrzeugen

Die Senkung des Kraftstoffverbrauches und die Reduzierung des Treibhausgases CO₂ sind der wichtigste Grund (Motivation) ein Hybridantriebskonzept für Personenkraftwagen zu bauen. Das Haupteinsparungspotential ist sehr stark von der Art und dem Grad der Hybridisierung (Micro-, Mild-, Full-Hybrid) und von dem Nutzungsprofil (Stadt-, Land- Autobahnfahrt) abhängig.

In den EU Staaten gilt für PKW ab 2012 ein Zielwert für den Flottenverbrauch in der Höhe von 120 g CO₂ pro Kilometer für die Durchschnittsemission aller EU-weit neu zugelassenen Pkw, siehe auch Abschnitt 3.

11.1 Schadstoffemissionen

Der Gesetzgeber schreibt maximale Abgasgrenzwerte bei der Typprüfung zur Erteilung der allgemeinen Betriebserlaubnis, als auch bei nachträglichen Überprüfungen der Schadstoffemissionen (Abgasuntersuchung) vor.

Tabelle 11.1 zeigt die Abgasgrenzwerte in g/km für PKW und Kombi der Fahrzeugklasse M1 ($\leq 2,5 \text{ t} \leq 6$ Sitze) mit Ottomotor in Europa für die Typprüfung.

Fahrzeugklasse und Norm	Kohlenmonoxid (g/km)	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (g/km)	Stickoxide (g/km)	Partikel (g/km)
M1	CO	HC	NO _x	PM
Euro 5 seit 2009	1,00	0,10	0,06	0,005
Euro 6 ab 2014	1,00	0,10	0,06	0,005

Tabelle 11.1 PKW mit Ottomotor. Abgasgrenzwerte in Europa.¹¹³

Tabelle 11.2 zeigt die Abgasgrenzwerte in g/km für PKW und Kombi der Fahrzeugklasse M1 ($\leq 2,5 \text{ t} \leq 6$ Sitze) mit Dieselmotor in Europa.

Fahrzeugklasse und Norm	Kohlenmonoxid (g/km)	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Stickoxide (g/km)	Stickoxide (g/km)	Partikel (g/km)
M1	CO	HC + NO _x	NO _x	PM
Euro 5 seit 2009	0,5	0,23	0,18	0,005
Euro 6 ab 2014	0,5	0,17	0,08	0,005

Tabelle 11.2 PKW mit Dieselmotor. Abgasgrenzwerte in Europa.¹¹³

¹¹³ Vgl. Europa (1) 2008, S. 258

11.2 Abgasprüfung für die Typzulassung

Im Rahmen der Typprüfung zur Erlangung der allgemeinen Betriebserlaubnis von Pkw und leichten Nkw wird die Abgasprüfung am Fahrzeug auf Rollenprüfständen durchgeführt. Die Prüfung unterscheidet sich damit von Abgasprüfungen, die z.B. im Rahmen der Feldüberwachung mit Werkstattprüfgeräten durchgeführt werden.

Die vorgeschriebenen Testzyklen, die auf dem Rollenprüfstand gefahren werden, sind so definiert, dass der praktische Fahrbetrieb auf der Straße annähernd nachgebildet wird. Die Messung auf einem Rollenprüfstand bietet dabei Vorteile gegenüber der tatsächlichen Straßenfahrt:

- Die Ergebnisse sind gut reproduzierbar, da die Umgebungsbedingungen konstant gehalten werden können.
- Die Tests sind vergleichbar, da ein definiertes Geschwindigkeits-Zeit-Profil unabhängig vom Verkehrsfluss abgefahren werden kann.
- Die erforderliche Messtechnik kann stationär aufgebaut werden.

Der neue europäische Testzyklus für Pkw (NEFZ)

Im Gegensatz zum Neuen Europäischen Fahrzyklus (Euro 2), der erst 40 Sekunden nach Start des Fahrzeugs einsetzte, bezieht der modifizierte NEFZ auch die Kaltstartphase mit ein.

Konditionierung

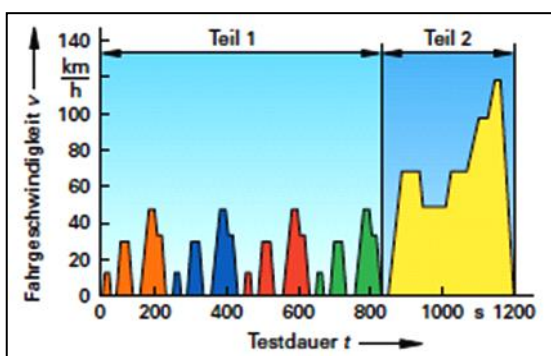
Zur Konditionierung wird das Fahrzeug bei 20...30 °C mindestens 6 Stunden abgestellt.

Sammeln der Schadstoffe

Das Abgas wird während zwei Phasen in Beuteln gesammelt.

Teil 1: innerstädtischer Zyklus (UDC, Urban Driving Cycle) mit maximal 50 km/h,

Teil 2: außerstädtischer Zyklus mit Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h.



Zykluslänge.....11 km
 Zyklusdauer.....1180 s
 Mittlere Geschwindigkeit.....32,5 km /h
 Maximale Geschwindigkeit...120 km/h

Abb. 11.1 Neuer Europäischer Fahrzyklus.¹¹⁴

¹¹⁴ Vgl. Europa (2) 2009, S. 325

Auswertung

Die durch die Auswertung des Beutelinhalts ermittelten Schadstoffmassen werden auf die Wegstrecke bezogen.

11.3 Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch wird aus den Emissionen des Abgastestes ermittelt. Die Fahrzeughersteller sind verpflichtet, den Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge anzugeben.

Der genormte NEFZ liefert Verbrauchswerte, mit denen sich die Kraftstoffverbräuche objektiv vergleichen lassen. Er berücksichtigt aber nicht, wie PKW tatsächlich gefahren werden. Daraus folgt, dass unrealistisch niedrige Verbrauchswerte herauskommen und von den Fahrzeugherstellern entsprechend umworben werden. Es wird auch der Einfluss zahlreicher physikalischer Parameter auf den Verbrauch nicht richtig bewertet.

- Beschleunigungen von 0 auf 50 km/h in 26 s sind unrealistisch.
Schwerere PkW werden bevorzugt, (Geländewagen, Vans, SUV).
- Praktisch keine Abschnitte mit längerer Konstantfahrt
- Keine Steigungen enthalten
- Nebenverbraucher werden nicht berücksichtigt.
- Der Max. Geschwindigkeitsbereich von nur 120 km/h ist sehr kurz.
Aerodynamisch ungünstige Fahrzeuge schneiden besser ab.
(Geländewagen, Vans, SUV...Sport Utility Vehicle)

Bei Hybridfahrzeugen muss beachtet werden, dass je nach Ladezustand (SOC...State of Charge) der Batterie zu Beginn und am Ende des Fahrzyklus die Verbrauchswerte stark schwanken können. Für die Kraftstoffverbrauchsmessung ist es daher wesentlich, welcher Batterieladezustand bei Beginn des Messzyklus herrscht.¹¹⁵

Die CO₂-Emissions- und Verbrauchswerte müssen unter Berücksichtigung der Batterieladebilanz und des Batterieladezustandes korrigiert werden.

(Batterieladezustand beliebig, Vollladung, Mindestladung, max. Strom- oder Kraftstoffverbrauch, Norm ECE-R 101, Anhang 9).

Durch die Zunahme der elektrischen Antriebe und Apparate zur Erhöhung des Komforts und der Sicherheit und der Unterhaltung, werden Verbrauchsangaben der Hersteller zumindest in Europa immer realitätsferner. Daher müssen verstärkt Werte aus der Praxis herangezogen werden.

¹¹⁵ Vgl. Hofmann 2010, S. 258

In Büchern, Artikeln und auf Hompages werden abhängig vom Hybridkonzept Verbrauchseinsparungen von 15 % bis 25 % zu konventionellen Antrieben mit Ottomotoren zitiert. Diese Angaben stimmen für den Europäischen Fahrzyklus, oder stammen aus Simulationsrechnungen.¹¹⁶ Das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil des NEFZ ist für das Erreichen niedriger Emissions- und Verbrauchswerte für Hybridfahrzeuge gut geeignet.

Hybridklasse Funktion	Full-Hybrid	Mild-Hybrid	Micro-Hybrid
Start Stopp	x	x	x
Rekuperation	x	x	(x)
Boost-Funktion	x	x	
Elektrisch Fahren	x		
Einsparung	<30%	<15%	5<10%

Tabelle 11.3 Kraftstoffeinsparungspotential.¹¹⁷

Tabelle 11.3 zeigt Kraftstoffverbrauchswerte von Serien-Hybridfahrzeugen und konventionellen Serien-Dieselfahrzeugen. Die Verbrauchswerte aller vier Fahrzeuge wurden unter den gleichen Bedingungen ermittelt. Die Werte sollen die Abweichungen zum Normverbrauch und das Verbrauchspotential von Nicht-Hybridfahrzeugen aufzeigen.

Fahrzeugtyp	Toyota Prius 1,8 Life	Honda Insight 1,3 Comfort	VW Golf 1,6 TDI Blue Motion	Volvo C30 1,6 D Drive, Start/Stop
Antrieb	Voll-Hybrid	Mild-Hybrid	Standardantrieb	Standardantrieb
ECE-Gesamtverbrauch L/100 km (Stadt plus über Land)	4,0 S	4,4 S	3,8 D	3,8 D
CO ₂ g/km (aus ECE-Gesamt)	92	101	99	99
Praxis-Testverbrauch L/100 km (Normrunde, über Land, Autobahn)	5,5 S	6,0 S	4,7 D	4,7 D
CO ₂ g/km (Testverbrauch)	128	139	124	124
S = Superbenzin, D = Diesel				

Tabelle 11.4 Gemessene Kraftstoffverbräuche.¹¹⁸

Analysiert man die Teilergebnisse der Praxismessungen (siehe Anhang, Tabelle A3) ergibt sich je nach Hybridkonzept ein Einsparpotential bei Stadtfahrt und Konstantfahrt mit geringerer Geschwindigkeit. Bei höheren Geschwindigkeiten ist der Verbrauch bei den getesteten Hybridfahrzeugen höher als bei den konventionellen Fahrzeugen (siehe auch S. 31, Fußnote 44).

¹¹⁶ Vgl. Hofmann 2010, S. 88¹¹⁷ Vgl. Schäfer 2007, S. 327¹¹⁸ Vgl. Auto-Motor-Sport (2) 2010, S. 71

Zu beachten ist, dass es sich nicht um die gleichen Fahrzeuge handelt (Gewicht, Luftwiderstand). Der Praxisversuch ist nachvollziehbar beschrieben.

Die bisherigen Praxiswerte für diesen und andere Verbrauchsmessungen mit Hybridfahrzeugen ergeben abhängig vom Fahrprofil (Stadt, Überland, Autobahn) nicht so ein hohes oder gar kein Sparpotential. Stärker als bei Otto- oder Dieselantrieben ist der Kraftstoffverbrauch eines Hybridantriebs vom Fahrprofil abhängig. Die angegebenen Verbrauchseinsparungen sind daher als maximal mögliches Potenzial anzusehen. Je gleichmäßiger und schneller das Fahrzeug im Straßenverkehr bewegt wird, desto geringer ist der Verbrauchsvorteil gegenüber den klassischen Antrieben.

Mit einem modernen Mittelklassewagen mit Start-Stopp System und Leichtlaufreifen kann auch ein geringer Kraftstoffverbrauch und CO₂ Ausstoß erreicht werden.

Für den Stadt- und Überlandverkehr mit Klein- und Mittelklassefahrzeugen stellt sich die Frage, ob nicht ein möglichst leichtes Fahrzeug mit ultrasparsamem Dieselmotor oder sogar Downsizing-Ottomotor sinnvoller ist. Eine zukünftige Geschwindigkeitsbegrenzung auf den Autobahnen würde auch dem Hybridantrieb zu gute kommen bzw. überflüssig machen.

Bisher war der Hauptmarkt für Hybridfahrzeuge USA und Japan. In diesen Ländern werden die Personenkraftwagen überwiegend von Ottomotoren angetrieben. Ab 2011 werden europäische Hersteller Hybridfahrzeuge mit Dieselmotor auf den Markt bringen. Im Vergleich zu modernen Dieselmotoren ist das Einsparpotential von Ottomotoren mit Elektromotor auch bei schweren PKW (VANS, SUV) gering.

Auch die Markteinführung von PKW - Voll-Hybriden mit Range Extender steht bevor. Es wird sich zeigen, ob sich mit diesen Fahrzeugen in der Praxis eine signifikante Kraftstoffverbrauchsreduzierung und CO₂-Reduzierung erzielen lässt.

Die Einhaltung zukünftiger Abgasgesetze ist nur mit erheblichem technischem Aufwand möglich. Auch konventionelle Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor werden immer aufwendiger und teurer werden.

Der Hybridantrieb ist auch aufwendig und teuer, aber der Fahrzeuglenker profitiert unmittelbar vom rein elektrischen Fahren oder von der Boost-Funktion bzw. von der besseren Umwelteinstufung und den damit verbundenen Vorteilen. Die Hybridisierung hat für die großen Automärkte, wie China und die USA mit ihren Metropolen, besondere Bedeutung. Es ist sicher nur eine Frage der Zeit, dass in die Zentren großer Städte nur noch teil- oder vollelektrisch eingefahren werden darf (z.B. London).

Die Haupteinsparung bei Hybrid-PKW mit Ottomotoren kommt nicht, wie immer wieder angenommen und zitiert wird, von der Rekuperation, also der Energierückgewinnung beim Verzögern bzw. Bremsen, sondern durch den Einsatz eines speziell auf den Hybridbetrieb

abgestimmten Verbrennungsmotor und den damit verbundenen Betriebspunktverschiebungen mit Unterstützung des E-Antriebes sowie durch die speziellen Getriebe (CVT, E-CVT), die eine optimale Drehzahlabsenkung bzw. eine weitere Betriebspunktverlagerung des Verbrennungsmotors ermöglichen.

Rekuperation

Die theoretisch mögliche Rekuperationsenergie kann nur teilweise genutzt werden. Neben der Wirkungsgradkette (Generator, Umrichter, Batterie, Antriebsmotor) und aus Gründen der Batterielebensdauer darf der Ladezustand der Batterie nur in gewissen Grenzen variieren und auch der Ladestrom ist aus Gründen der Lebensdauer limitiert. Aufgrund ihrer Leistungsdichte von 10-2000 W/kg und wegen des Innenwiderstands der Batterien muss dieser Vorgang vergleichbar langsam und kontinuierlich stattfinden, sofern die Baugrößen in einem vertretbaren Bereich bleiben sollen.

Einsparungspotential durch Rekuperation 4 % bis 5 %.

Startstopp

Die Einsparungen durch das Start/Stopp-System von 8% in der Stadt bzw. 4 % im Überlandzyklus decken sich mit den Erfahrungen von konventionellen Fahrzeugen mit Start/Stopp Systemen, so genannte Mikro- oder Mild-Hybridfahrzeugen.

Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Zusatzmasse der Hybridkomponenten.

Simulationsrechnungen ergeben im NEFZ für einen PKW-Mild-Hybrid einen Mehrverbrauch von 2 %.¹¹⁹ Da ein Vollhybrid einen stärkeren Elektroantrieb hat (schwere E-Maschine, größere Batterie) wird auch der Verbrauch entsprechend höher sein.

¹¹⁹ Vgl. Hofmann, 2010, S. 88

12. Zusammenfassung

Da alle Energieumwandlungen wirkungsgradbehaftet sind, ist bei der Auslegung von Hybridantriebskonzepten eine Vielzahl von intelligenten Betriebsstrategien erforderlich, um den Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen zu reduzieren und gleichzeitig die elektrische Reichweite zu maximieren. Da Ladezyklen immer zusätzliche Verluste bedeuten, soll immer die von einem Generator erzeugte Strommenge direkt in einem Elektromotor abgearbeitet werden.

Für das Aufkommen der Hybridfahrzeuge werden vor allem zukünftige gesetzliche Vorgaben entscheidend sein. Noch strengere CO₂-Vorgaben, Vorschreibung von Null-Emissionskonzepten wie in den USA und Einfahrtsbeschränkungen für bestimmte Fahrzeuge in Städte oder definierte Zonen. Subventionen und steuerliche Begünstigungen werden den Hybridantrieb, Elektroantrieb und den Brennstoffzellenantrieb fördern. Der Kraftstoffverbrauch lässt sich mit der Hybridtechnologie auf Basis Verbrennungsmotor derzeit nicht signifikant verringern. Die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen und den damit verbundenen Umwelt- und Sozialproblemen kann damit nicht gelöst werden.

Der Hybridantrieb von Mikro-Hybrid über Mild-Hybrid bis Voll-Hybrid wird von den Fahrzeugentwicklern und Hersteller als eine Zwischenlösung bis zum Elektrofahrzeug angesehen. Es wird auch in absehbarer Zeit keinen universellen Antrieb geben. Vielmehr werden maßgeschneiderte Lösungen nebeneinander angeboten werden, ausgerichtet an den speziellen Einsatzbereichen der Fahrzeuge.

Elektrofahrzeuge werden nach diversen Studien und Prognosen auch in den nächsten Jahrzehnten nur einen geringen Marktanteil erzielen. Die Einführung ist vor allem von der Entwicklung der Batterietechnik abhängig. Erste Serienkleinwagen sind ab Ende 2010 bereits erhältlich. Auch bei den Elektrofahrzeugen muss die Gesamtenergiebilanz betrachtet werden. Abhängig von der Stromerzeugung verbraucht das Fahrzeug dann nicht zwingend weniger Energie und der CO₂ Ausstoß wird von der Straße zum Kraftwerk verlagert.

Große Chancen werden dagegen einer Wirkungsgradverbesserung des Verbrennungsmotors eingeräumt, um den Verbrauch weiter zu senken. Der Schwerpunkt der Optimierung liegt zukünftig nicht nur beim Verbrennungsmotor, sondern beim kompletten Antriebsstrang und den Nebenverbrauchern als zu optimierendes System. Den Anfang bildet die flächendeckende Einführung des einfachen Start-Stopp-System mit Bremsenergie-Rekuperation, die nächsten Stufen sind Hybridlösungen, Range Extender und schließlich das batteriegetriebene Elektrofahrzeug.

Bei Brennstoffzellenfahrzeugen bietet ein elektrischer Energiespeicher die Möglichkeit der Bremsenergierückgewinnung sowie einer schnelleren Anfahrbereitschaft beim Kaltstart.

Da bereits ein elektrisches System vorhanden, bedarf es zusätzlich nur eines vergleichbar kleinen elektrischen Energiespeichers, um die Hybridfunktionen darstellen zu können.

Mit Brennstoffzellen betriebene Elektrofahrzeuge können zukünftig die mit der Batterietechnik verbundenen Probleme wie geringe Reichweite, lange Ladezeit, reiner Elektrofahrzeuge vermeiden. Aus Sicht der Batteriegetriebenen Elektrofahrzeuge erscheint die Kombination von Verbrennungsmotor, Brennstoffzelle und Elektromaschine zu einem Hybridantrieb sinnvoll, da so die Vorteile der Antriebsarten z.B. hohe Reichweite, schnelles Nachtanken, regeneratives Bremsen (Rekuperation), Nutzung regenerativer Energiequellen sowie emissionsfreier Betrieb nutzbar sind.

Für die Nutzung von Brennstoffzellen als Energiequelle eines Kraftfahrzeuges muss der für den Betrieb benötigte Wasserstoff erzeugt, gespeichert und im Kraftfahrzeug mitgeführt werden. Dazu müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllt werden. Eine Verringerung der CO₂-Emissionen ergibt sich nur dann, wenn der Wasserstoff regenerativ aus Biomasse erzeugt wird oder durch Elektrolyse aus Wasser mit regenerativ erzeugtem Strom.

Die Automobilindustrie ist in den Industriestaaten ein wichtiger Wirtschaftsfaktor. Sie wird auch in Zukunft die Wünsche der Kunden nach Umwelt- und sozialverträglicher individueller Mobilität befriedigen. Ein Mittel dazu sind an zukünftige Bedingungen angepasste Fahrzeugkonzepte.

13. Schlussbemerkung

Ziel der Diplomarbeit war, Rahmenbedingungen aufzuzeigen, die die Einführung von Hybridfahrzeugen beeinflussen und das grundsätzliche Verständnis der besonderen Funktionen von Hybridantrieben in Serien-Personenkraftwagen, sowie deren Vor- und Nachteile, zu vermitteln.

Anhand der gewonnen Erkenntnisse sollte dann der Energieverbrauch im Vergleich zu modernen konventionellen Antrieben von Personenkraftwagen aufgezeigt werden und die Zweckmäßigkeit des Hybridantriebes auf Basis von Otto- und Dieselmotoren bewertet werden.

Die Ausarbeitung zeigt, dass das praktische Einsparpotential von Hybridfahrzeugen mit Ottomotor deutlich unter den theoretischen Angaben liegt und dass der Kraftstoffverbrauch wesentlich vom Fahrprofil abhängt. Im Vergleich zu modernen konventionellen PKW-Dieselfahrzeugen ist die durchschnittliche praktische Kraftstoffersparnis gering.

Für die flächendeckende Einführung von Hybridfahrzeugen ohne gesetzliche Vorgaben müssen aber die Konsumenten von dem Nutzen dieser komplexen Technologie überzeugt sein.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Babiel 2007** Gerhard Babiel: Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik. Vieweg & Sohn Verlag, GWV/Fachverlage GmbH Wiesbaden, 1. Auflage 2007.
- Bosch 2003 (1)** Robert Bosch GmbH: Kraftfahrzeugtechnisches Taschenbuch. Robert Bosch GmbH Plochingen, 25. Auflage 2003.
- Bosch 2007 (2)** Robert Bosch GmbH: Autoelektrik und Autoelektronik. Robert Bosch GmbH Plochingen, 5. Auflage 2007.
- Bosch 2008 (3)** Robert Bosch GmbH: Hybridantriebe, Brennstoffzellen und alternative Kraftstoffe. Robert Bosch GmbH Plochingen, 1. Ausgabe 2008.
- Basshuysen 2007** van Basshuysen/Schäfer (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen Komponenten, Systeme, Perspektiven. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV/Fachverlage GmbH, 3. Auflage Wiesbaden 2007.
- Cornel 2008** Cornel Stan: Alternative Antriebe für Automobile. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2. erweiterte Auflage 2008.
- Europa (1) 2008** Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik: Europa-Lehrmittel Verlag, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 16. Auflage (A), als Ausgabe für Österreich 2008.
- Europa (2) 2009** Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik: Europa-Lehrmittel Verlag, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 29. Auflage 2009.
- Fiola 2006** Ernst Fiala: Mensch und Fahrzeug. Fahrzeugführung und sanfte Technik. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage 2006.
- Grohe 1990** Heinz Grohe: Otto- und Dieselmotoren. Arbeitsweise, Aufbau und Berechnung von Zweitakt- und Viertakt-Verbrennungsmotoren. Vogel Verlag Würzburg, 9. Auflage 1990.

- Hofmann 2010** Peter Hofmann: Hybridantriebe. Ein Alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. Springer-Verlag Wien, 1. Auflage 2010.
- Isermann 2010** Rolf Isermann (Hrsg.): Elektrisches Management motorischer Fahrzeugantriebe Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe. Vieweg und Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage 2010.
- Kirchner 2007** Eckhard Kirchner: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage, 2007.
- Lämmerhirdt 1989** Erich-Herbert Lämmerhirdt: Elektrische Maschinen und Antriebe. Aufbau-Wirkungsweise-Prüfung-Anwendung. Hanser Verlag München, Wien, 1989.
- Matz 2009** Alexander Martin Matz, Alexander Elsässer: Alternative Antriebe im Kraftfahrzeug. Shaker Verlag GmbH Aachen, 1. Auflage 2009.
- Müller 1998** Herbert W. Müller: Die Umlaufgetriebe. Auslegung und vielseitige Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage 1998.
- Neubauer 1997** Hans-Otto Neubauer (Herausgeber): Die Chronik des Automobils. Bechtermünzverlag im Weltbildverlag GmbH Augsburg, 1997.
- Schäfer 2007** Heinz Schäfer (Hrsg.) und 73 Mitautoren: Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Expert Verlag Renningen, 1. Auflage 2007.

- Auto Motor u. Sport (1)** Wiesinger, Johannes: Test Mercedes S 400 Hybrid.
In: Auto-Motor und Sport. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2009), 13, S. 23.
- Auto Motor u. Sport (2)** Renz, Sebastian; Seufert Hans Dieter: Sparmeister Kompaktklasse.
In: Auto-Motor und Sport. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2010), 4, S. 66-73.
- MTZ-Zeitung** Winterhagen, Johannes: Letzte Change für die Brennstoffzelle?
In: Motortechnische Zeitung. – Wiesbaden: Springer Automotive Media/Springer Fachmedien GmbH. - 71(2010), 01, S. 8-13.
- Technik Profi (1)** Weitbrecht, Gottfried: Energieumwandlung im Ottomotor.
In: Technikprofi. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2009), 22, S. 13-16.
- Technik Profi (2)** Wiesinger, Johannes: Der elektrische Antrieb im Kfz.
In: Technikprofi. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2009), 24, S. 9.
- Technik Profi (3)** Weitbrecht, Gottfried: Technik im Detail: der Toyota Prius III (1).
In: Technikprofi. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2010), 04, S. 2.
- Technik Profi (4)** Deleker, Jo: Kfz-Technik/Hybridantrieb
In: Technikprofi. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2010), 06, S. 11.
- Technik Profi (5)** Weitbrecht, Gottfried: Technik im Detail: der Toyota Prius III (2).
In: Technikprofi. – Stuttgart: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. – (2010), 05, S. 4.

Auto/Motor 2010

auto-motor-und-sport.de <redaktion_ams@motorpresse.de>: Lohner-Porsche - erstes Hybridauto, erstmals Allradantrieb. URL:

<<http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/lohner-porsche-erstes-hybridauto-erstmal-allradantrieb-1939709.html>>, verfügbar am 25.07.2010.

Audi 2010

audi.de/de/brand/de.html: Hybrid Historie. URL:

<http://www.audi.de/de/brand/de/erlebniswelt/design___technologie/design-studien/q7_hybrid_concept.tab_0004.html#source=http://www.audi.de/de/brand/de/erlebniswelt/design___technologie/design-studien/q7_hybrid_concept.tab_0004.html&container=tabAjax>, verfügbar 30.08.2010.

General Motors 2010

URL:

<http://gm.wieck.com/forms/gm/X07PT_AR012.jpg?download=029941>, verfügbar am 17.09. 2010.

Motorlexikon 2010

motorlexikon.de, <mailto:r.vanbasshuysen@motorlexikon.de>: Hybridfahrzeuge-Historie. URL:

<<http://www.motorlexikon.de/?I=9480&R=H>>, verfügbar am 05.10.2010.

Porsche 2010

porsche.de <mailto:info.museum@porsche.de> : Lohner Porsche: das erste Hybridfahrzeug. URL:

<<http://www.porsche.com/germany/aboutporsche/porscheandenvironment/hybrid/lohnerporsche/>>, verfügbar am 30.8.2010.

Toyota 2010

<kundenbetreuung@toyota.de>: PriusGalerie. URL:

<http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/gallery.aspx>, verfügbar am 17.9.2010.

United Nations 2008

Uno-World Population Prospects (2008 Revision). URL:

<<http://esa.un.org/unpp/index.asp?panel=1>>, verfügbar am 14.9.2010.

Anhang A

Anhang A1: Bezeichnungen im Kapitel leistungsverzweigter Hybridantrieb

ω_{VKM}	Winkelgeschwindigkeit der Verbrennungskraftmaschine	s^{-1}
M_{VKM}	Drehmoment der Verbrennungskraftmaschine	Nm
P_{VKM}	Leistung der Verbrennungskraftmaschine	kW
ω_{VE}	Winkelgeschwindigkeit am Variatoreingang	s^{-1}
M_{VE}	Drehmoment am Variatoreingang	Nm
P_{VE}	Leistung am Variatoreingang	kW
ω_{VA}	Winkelgeschwindigkeit am Variatorausgang	s^{-1}
M_{VA}	Drehmoment am Variatorausgang	Nm
P_{VA}	Leistung am Variatorausgang	kW
ω_{AB}	Winkelgeschwindigkeit am Getriebeausgang	s^{-1}
M_{AB}	Drehmoment am Getriebeausgang	Nm
P_{AB}	Leistung am Getriebeausgang	kW
P_{EL}	Übertragene elektrische Leistung im elektrischen Kreis	kW
P_{VKM}	Leistung der Verbrennungskraftmaschine	kW
P_{VE}	Mechanisch aufgenommene Leistung der E-Maschine	kW
ε	Aufteilungsfaktor	-----
η_{E1}	Wirkungsgrad der E-Maschine E1	-----
η_{MECH}	Mechanischer Wirkungsgrad des Getriebes	-----
ε_{EL}	Verhältnis der elektrisch übertragenen Leistung zur der von der Verbrennungskraftmaschine abgegebenen Leistung	-----
P_{EL}	Übertragene elektrische Leistung im elektrischen Kreis	kW
P_{VKM}	Leistung der Verbrennungskraftmaschine	kW
ε	Aufteilungsfaktor	-----
η_{E1}	Wirkungsgrad der E-Maschine E1	-----
η_{GES}	Gesamtwirkungsgrad	-----
ε_{EL}	Verhältnis der elektrisch übertragenen Leistung zur der von der Verbrennungskraftmaschine abgegebenen Leistung	-----
η_{E1}	Wirkungsgrad der E-Maschine E1	-----
η_{E2}	Wirkungsgrad der E-Maschine E2	-----
η_{MECH}	Mechanischer Wirkungsgrad des Getriebes	-----
Z_s	Zähnezahl des Sonnenrades	
Z_H	Zähnezahl des Hohlrades	
ST	Steg (Planetenradträger)	
(-)	Drehrichtungsumkehr.	

Anhang A2: Funktionen und Nutzen verschiedener Hybridvarianten

Funktionen und Nutzen	Micro-Hybrid	Mild Hybrid	Full Hybrid	Plug-In-Hybrid
Konstruktive Merkmale	Leistungsfähiger Anlasser und regelbarer Generator oder Riemenstarter-generator	Kurbelwellen-Startergenerator (KSG)	Trennkupplung zum Verbrennungsmotor oder mehrere E-Maschinen	Verbrennungsmotor als Range Extender
Funktionen	Start/Stop Eingeschränkte Rekuperation	Start/Stop Rekuperation Boosten Generator-betrieb Eingeschränkt elektrisch fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten	Start/Stop Rekuperation Boosten Generatorbetrieb E-Fahren für kurze Reichweiten	Start/Stop Rekuperation Boosten Generator-betrieb E-Fahren für mittlere Reichweiten Externe Nachladung
Leistung der E-Maschine	2-3 kW	10-15 kW	>>15 kW	>>15 kW
Spannungsniveau Traktionsbatterie	12-42 V	40-150 V	>200 V	>200 V
Spannungsniveau Bordnetz	12-42 V	12 V	12 V	12 V
Typische Batterietechnologie	Blei Säure, AGM	NiMH, Li-Ion Supercaps, Blei-Säure	NiMH, Li-Ion (Blei-Säure)	NiMH, Li-Ion (Blei-Säure)
Verbrauchseinsparung	5-10 %	10-20 %	>20 %	
	BMW 1er Bj. 2007 Saturn VUE Greenline Hybrid 2007 Smart Fortwo	Chevrolet Silverado 2004 Citroen C4 Hybrid HDi 2006 GMC Sierra 2004 Honda Civic IMA 2004 und 2006 Honda Insight IMA 1999	Audi Duo 1997 Audi Q7 Hybrid 2005 BMW X3 Efficient Dynamics 2005 Chevrolet Tahoe Hybrid 2008 Ford Escape Hybrid 2005	Volvo Recharge Renault Kangoo Elect'road Renault Kangoo Cleanova 11 Opel Flextrime VW Twin Drive

Funktionen und Nutzen	Micro-Hybrid	Mild Hybrid	Full Hybrid	Plug-In-Hybrid
		Peugeot 307 Hybrid HDi 2006 Saturn Aura Greenline Hybrid Mercedes S400 Hybrid 2009 Honda CR-Z Hybrid 2010	GMC Yukon Hybrid 2008 Lexus RX400h 2005 Toyota Prius 2001 Mercedes ML450 VW Touareg 2010 Toyota Auris 2010	Toyota Prius Plug-In ab 2012

Quelle: Hofmann 2010, S. 19 mit eigenen Ergänzungen

Anhang A3. Quelle: Auto Motor und Sport, Heft 4 Seite 71, vom 28.01.2010

SO WURDE GETESTET

Vor allem wurde viel gefahren: 13 389 Kilometer legten die zehn Autos insgesamt zurück, durchliefen neben dem umfangreichen auto motor und sport-Standard-Testprogramm eine umfassende Verbrauchsprüfung. Bei der rund 280 Kilometer langen, bewusst ökonomisch gefahrenen Normrunde mit ihrem gewichtigen Stadtanteil geht es um die Ermittlung des unter realen Verkehrsbedingungen erzielbaren Mindestkonsums. Deshalb wurde darauf verzichtet, zusätzliche Verbraucher wie etwa die Klimaanlage zu nutzen. Nicht so auf den je 200 Kilometer langen Autobahn- und Landstraßentouren, die zeigen, wie viel die Autos verbrauchen, wenn sie zurückhaltend und vorausschauend, aber nicht kompromisslos sparsam gefahren werden. Dabei hielten sich die

Tester an die Vorgaben der Spritsparhelfer wie etwa die Schaltanzeigen. So ergab sich auf der Landstraße mit Ortsdurchfahrten ein Durchschnittstempo von 60 km/h. Auf der Autobahn begnügten sich die Tester außerhalb limitierter Abschnitte mit 130 km/h. Der Schnitt lag bei 110 km/h – auch bei den Gasautos, deren Strecke wegen des Tankstellennetzes von der für Diesel und Hybride abwich. Zur Vermeidung von Tankfehlern wurde ein Auto stets vom gleichen Tester an derselben Zapfsäule aufgefüllt. Unterwegs wechselten die Fahrer regelmäßig die Autos – so hatte die individuelle Fahrweise keinen Einfluss. Um eine gemeinsame Messgröße der vier Kraftstoffe zu erhalten, wurde der Durchschnittsverbrauch in Gramm CO₂/km umgerechnet.

VERBRÄUCHE UND KOSTEN DER ZEHN SPARMEISTER

Fahrzeugtyp		Audi A3 1.6 TDi Attraction	BMW 116d	Honda Insight 1.3 Comfort	Hyundai i30 cw 1.6 CRDi Blue Style	Mercedes A 160 CDI Avantgarde	Mercedes B 180 NGT	Toyota Prius Life	Volvo C30 1.6 D Drive Start-Stopp	VW Golf 1.6 TDI Blue Mo- tion Trendl.	VW Golf 1.6 Bi-Fuel Trendline
ECE-Verbrauch	L/100 km	4,1 D	4,4 D	4,4 S	4,6 D	4,5 D	4,9 kg CNG	4,0 S	3,8 D	3,8 D	9,2 LPG
CO ₂ (aus ECE)	g/km	109	118	101	122	118	135	92	99	99	149
Verbrauch	über Land	4,8 D	5,4 D	6,4 S	5,3 D	5,0 D	4,6 kg CNG	6,1 S	5,3 D	5,1 D	8,9 LPG
	Autobahn	5,3 D	6,4 D	6,5 S	6,0 D	6,0 D	5,3 kg CNG	6,6 S	4,8 D	5,1 D	10,0 LPG
	Normrunde	5,1 D	4,4 D	5,1 S	4,9 D	4,4 D	4,4 kg CNG	3,9 S	4,1 D	4,0 D	8,7 LPG
Testverbrauch	L/100 km	5,1 D	5,4 D	6,0 S	5,4 D	5,1 D	4,8 kg CNG	5,5 S	4,7	4,7	9,2
CO ₂ (aus Testverbrauch)	g/km	134	142	139	142	134	131	128	124	124	149
Kraftstoffkosten/100 km	in Euro	6,07	6,43	8,34	6,43	6,07	4,75	7,65	5,59	5,59	5,52

Kraftstoffpreise: Superbenzin 1,39 Euro/Liter, Diesel 1,19 Euro/Liter, Flüssiggas 0,60 Euro/Liter, Erdgas 0,99 Euro/Kilogramm